

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»

УДК 53.082.73, 622.377.6, 666.655,
681.11.032.32, 681.586.35, 681.586.48

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л.Д. Писаренко
(підпис)

«__» грудня 2019 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 171 Електроніка
на тему: «П'єзофототронний ефект в діодних структурах»

Виконав:

Студент II курсу, групи ДЕ-81мп
Клименко Владислав Анатолійович

Керівник:

старший викладач ЕП та П, к.т.н.,
Семікіна Т.В.

Консультант:

доцент ЕП та П, к.т.н.
Чадюк В.О.

Рецензент:

старший науковий співробітник ІФН НАНУ, к.ф.-м.н.,
Мамікін С.В.

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 171 Електроніка (Електроні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Л.Д. Писаренко
(підпис)

«___» грудня 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Клименко Владиславу Анатолійовичу

1. Тема дисертації: «П'єзофототронний ефект в діодних структурах», науковий керівник дисертації: Семікіна Тетяна Вікторівна, старший викладач, к.т.н., затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. № 3859-с
2. Термін подання студентом дисертації: «___» грудня 2019 р.
3. Об'єкт дослідження: п'єзоелектричні тонкоплівкові структури на основі матеріалів групи А2Б6.
4. Вихідні дані: огляд різновидів матеріалів для п'єзотроніки і п'єзофототроніки, експериментальний процес вирощування тонкоплівкових гетероструктур, інженерний розрахунок: вольт-амперних характеристик п'єзоелектричних плівок на основі матеріалів групи А2Б6, коефіцієнту неідеальності зразків, коефіцієнту чутливості зразків, відношення зворотнього опору по постійному струму до прямого, параметру зміни висоти бар'єру, параметру “відгук по зміні опору”.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: експериментальним шляхом, методом термічного осадження, виростити плівки чотирьох різних структурних груп на основі матеріалів А2Б6; побудувати експериментальну установку для подальших досліджень вольт-амперних характеристик при

увімкненій та вимкненій лампі, без тиску / при прикладанні тиску до структури / при скручуванні; провести інженерно-математичні операції для аналізу параметрів та характеристик отриманих зразків; побудувати таблиці та графіки залежностей отриманих числових значень параметрів та характеристик зразків; проаналізувати отримані результати та зробити висновки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: схематичні зображення, функціональні та конструкторсько-технологічні схеми, структурні схеми; плакати з формулами, графіками.
7. Орієнтовний перелік публікацій: Дослідження п'єзоелектричних властивостей гетеропереходів на основі плівок A2B6, дослідження п'єзовластивостей плівок CdS методом резонансу-антирезонансу.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	доцент ЕП та П, к.т.н., Чадюк В.О.	07.09.2019 _____	14.09.2019 _____
	доцент ЕП та П, к.т.н., Чадюк В.О.	11.11.2019 _____	28.11.2019 _____

9. Дата видачі завдання «3» вересня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури на тему п'єзофототронний ефект.	20.03.2019	
2	Дослідження матеріалів, що володіють п'єзофоторонним ефектом.	05.05.2019	
3	Дослідження групи матеріалів A2B6 і п'єзоефекту на них.	11.06.2019	
4	Вирощування тонкої п'єзоплівки. Створення	10.09.2019	

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

	гетероструктури ZnS – CdSe.		
4	Дослідження параметрів та характеристик виготовленої п'єзоплівки.	15.09.2019	
5	Інженерно-розрахунковий процес параметрів та характеристик досліджених діодних структур.	23.10.2019	
6	Розробка стартап проекту.	11.11.2019	
7	Оформлення графічної частини, пояснювальної записки, плакатів, підготовка доповіді.	29.11.2019	

Студент

(підпис)

Клименко В.А.

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Семікіна Т.В.

РЕФЕРАТ

«П'єзофототронний ефект в діодних структурах»

Магістерська робота напряму підготовки 171 – «Електроніка» спеціалізації «Електронні прилади та пристрої». Клименко Владислав Анатолійович. «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Факультет електроніки. Кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-81мп. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. – 104 с., іл. 219, табл. 23.

Ключові слова: п'єзотроніка, п'єзофототроніка, п'єзопотенціал, М-Н/п – метал-напівпровідник, ДМОН – Додатковий метал-оксид-напівпровідник, ПЗТ – п'єзотехнологічна плівка, гетероструктура, опір по постійному струму, диференційний опір, чутливість, висота бар'єру, коефіцієнт випрямлення, відгук по зміні опору, інтерфейс, деформація, нанодріт.

Короткий зміст роботи: дана дипломна робота присвячена дослідженню діодних структур на основі тонких плівок А2Б6 із п'єзотронним та п'єзофототронним ефектами, в ній представлено результати інженерних, експериментально отриманих, залежностей параметрів та характеристик п'єзоплівки, використовуваних в п'єзотроніці та п'єзофототроніці.

У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної інформації по п'єзотроніці та п'єзофототроніці як окремого різновиду приладів та пристроїв, основні параметри та характеристики п'єзотроніків і п'єзофототроніків, та підтверджена перспективність їх розробки. В оглядовій частині також приведені основні існуючі види матеріалів, що володіють явищем п'єзотроніки і п'єзофототроніки, та принципи їх роботи. В експериментальному розділі приведений детальний опис практичних досліджень вольт-амперних характеристик. В інженерно-розрахунковому розділі наведені формули та обчислення параметрів і характеристик для додаткового аналізу зразків.

АНОТАЦІЯ

Дана дипломна робота присвячена дослідженню діодних структур на основі тонких плівок А2В6 із п'єзофототронним ефектом. В ній представлені результати інженерно-практичних досліджень та розрахунків вольт-амперних характеристик при змінному прикладеному тиску і освітленні в системі гетероструктури.

Робота складається із вступу, аналізу літератури, теоретичної частини, експериментальної частини, інженерних розрахунків, стартап розділу та висновків. У вступі сформульовано головну задачу роботи і показано її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної інформації по п'єзофототроніці і п'єзотроніці як окремих різновидів приладів та пристроїв, їх основні параметри та характеристики, підтверджена перспективність розробки останніх. В теоретичній частині приведені основні існуючі види матеріалів, що володіють явищем п'єзофототроніки і п'єзотроніки, принципи їх роботи. В експериментальному розділі представлено основні етапи практичних досліджень п'єзоелектричних плівок, виконаних у вигляді діодних структур, розроблену технологію осадження п'єзоелектричних структур вакуумним методом термічного осадження в квазі-замкнутому просторі. Досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктур на основі плівок А2В6 в умовах вимірювання без тиску при увімкненому та вимкненому світлодіоді; при прикладанні тиску до структури при увімкненому та вимкненому світлодіоді; при скручуванні при увімкненому та вимкненому світлодіоді.

S U M M A R Y

This graduate work is devoted to the research of diode structures based on thin films A₂B₆ with piezoelectric effect. It presents the results of engineering and practical studies and calculations of current-voltage characteristics with variable applied pressure under different lighting and by twisting in the heterostructure system.

The work consists of introduction, analysis of literature, theoretical part, experimental part, engineering calculations, startup part and conclusions. In the introduction the main purpose of the work is formulated and its relevance is shown. The analysis of the literature presents an overview of scientific and technical information on piezotronics and piezophototronics as a separate variety of instruments and devices, the main parameters and characteristics of piezotronics and piezophototronics, and the confirmation for the prospects for their development. In the theoretical part, the main existing types of materials possessing the piezotronic and piezophototronic effect and the principles of their operation are presented. The experimental part presents the main stages of practical studies of piezoelectric films made by form of diode structures, the technology of deposition of piezoelectric structures by vacuum thermal deposition method in quasi-closed space. Volt-ampere characteristics (VAC) of heterostructures based on A₂B₆ films were investigated under pressure-free measurement conditions with the LED on and off; when applying pressure to the structure while the LED is on and off; when twisting while the LED is on and off.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	9
Вступ.....	10
1. Основи п'єзо- та п'єзофототронних явищ	12
1.1. Система матеріалів для п'єзотроніки і п'єзофототроніки.....	12
1.2. П'єзотроніка	13
1.3. П'єзофототроніка.....	16
Висновки і перспективи	18
2. Експериментальна частина.	19
2.1. Технологія осадження плівок групи А2В6 та технологічне обладнання.....	19
Висновки	20
2.2. Виміри електричних параметрів та вольт-амперних характеристик структур	21
Висновки	44
3. Інженерно-розрахункова частина	45
Висновки	93
Загальні висновки.....	94
4. Стартап проект.....	96
Висновки:.....	101
Перелік використаної науково-технічної літератури:	102

					МРП 171.081.007 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Клименко В. А.			П'єзофототронний ефект в діодних структурах	Літ.	Арк.
Перевір.							8
Реценз.						КПІ ім. І. Сікорського	
Н. Контр.							
Затверд.		Семікіна Т.В.					

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

ПД	п'єзоелектричний датчик
УФ	ультра-фіолет
ЦТС	цирконат-титанат свинцю
ПКР	полікристал
ПЕ	п'єзоелектрик
ПРП	п'єзоелектрично-модульована резистивна комірка пам'яті
ПЗТ (PZT)	п'єзотехнологія (п'єзотехнологічна плівка наприклад)
E –	напруженість електричного поля
P –	вектор поляризації
ε –	діелектрична проникність
q –	заряд електрона
k –	стала Больцмана
T –	температура переходу
n –	коефіцієнт неідеальності
R_{Serial} –	послідовний опір
R_{Shunt} –	шунтуючий опір
R_F –	прямий опір по постійному струму
r_F –	динамічний прямий опір
R_R –	зворотній опір по постійному струму
r_R –	динамічний зворотній опір
U_{OC} –	напруга холостого ходу
I_{SC} –	струм короткого замикання
K –	коефіцієнт випрямлення діоду
$\Delta\Phi$ –	зміна висоти бар'єру
$\Delta R/R_0$ –	відгук по зміні опору
S –	чутливість зразку

Вступ

Сучасна електроніка та оптоелектроніка зазвичай засновані на Si, II - VI і III - V складних напівпровідникових матеріалах із акцентом на технології ДМОН(додатковий метал-оксид-напівпровідник), світлодіодах, фотонних детекторах, сонячних елементах і перетворювачах енергії. Розробки в області створення нових п'єзоелектричних перетворювачів є необхідними в зв'язку з різноманітними областями їх застосування[1]:

- в приладах для вимірювання параметрів механічних процесів, в тому числі: сили, акустичного і швидкозмінного тиску, лінійних і кутових прискорень, а також вібрації, ударів;
- в гідроакустиці і дефектоскопії як випромінювачі ультразвуку;
- для юстування дзеркал оптичних приладів та виконавчих елементів систем автоматики;
- в смугових фільтрах, лініях затримки, перетворювачах переміщення або приєднаної маси в частоту для датчиків рівня, щільності та ін. в якості п'єзоелектричних резонаторів, що найбільш ефективно випромінюють і приймають енергію на фіксованій резонансній частоті.

П'єзоелектрика спирається на перовскітні матеріали, які не використовуються в електроніці та оптоелектроніці. Внаслідок гігантських відмінностей в системах матеріалів, перекриття між п'єзоелектрикою і оптоелектронікою досить обмежене. З використанням вюрцитних матеріалів, таких як ZnO, GaN і InN, які одночасно володіють п'єзоелектричними і напівпровідниковими властивостями, науковці зв'язали п'єзоелектрику з оптоелектронними процесами збудження і створили кілька нових областей, рис. 1. Основа спирається на п'єзопотенціал, який створюється в п'єзоелектричному матеріалі шляхом прикладання тиску (деформації), шляхом поляризації іонів в кристалі. П'єзотроніка – окремий підвид

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

електроніки, пристрої якого виготовлені з використанням п'єзопотенціалу в якості напруги «затвору» для керування перенесенням заряду на межі розподілу. П'єзофототронний ефект полягає в використанні п'єзопотенціалу для управління генерацією, перенесенням, поділом і / або рекомбінацією носіїв для поліпшення характеристик оптоелектронних пристроїв, таких як фотонний детектор, сонячний елемент і світлодіод.

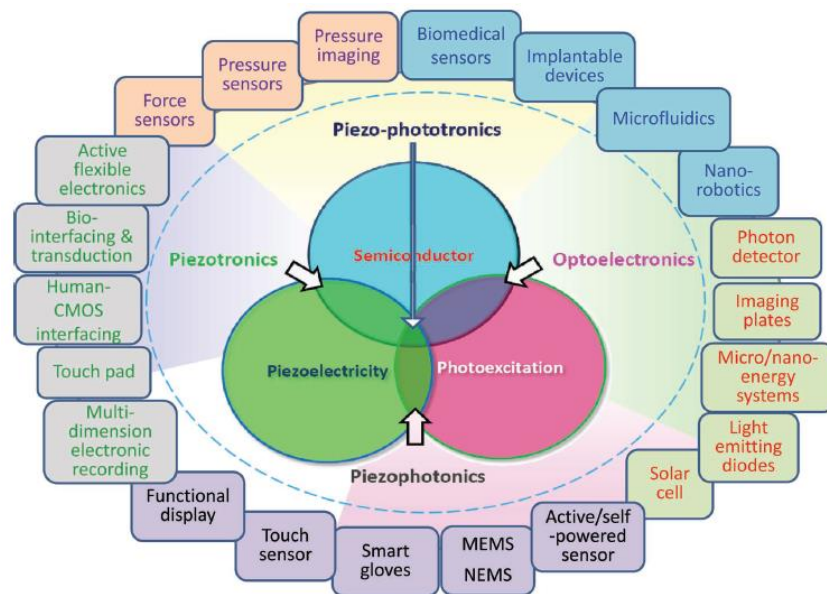


Рис. 1. Принципова схема, що показує тристоронній зв'язок між п'єзоелектрикою, фотозбудженням і напівпровідником. Схема є основою п'єзотроніки (п'єзоелектрико-напівпровідниковий зв'язок), п'єзофотоніки (п'єзоелектрично-фотонний зв'язок збудження), оптоелектроніки і п'єзофототроніки (п'єзоелектрика-напівпровідник-фотозбудження).

Прогнозуються потенційні застосування п'єзотроніки, п'єзофототроніки і наногенераторів, які є важливими напрямками і полями досліджень в майбутньому. П'єзотроніка матиме важливе застосування в сенсорах, кремнієвій електроніці, MEMS технологіях, нано-робототехніці і активній гнучкій електроніці. Ми очікуємо в найближчому майбутньому застосування п'єзотроніки і п'єзофототроніки в сенсорних мережах, біо-науці, енергетиці а також в інтеграції інтерфейсу людина-машина.

1. Основи п'єзо- та п'єзофототронних явищ

На початку XXI століття п'єзотехніка переживає бум у своєму розвитку. Розширюються сфери застосування п'єзоелектричних перетворювачів різного призначення: від п'єзо-запальничок, акустичних випромінювачів і приймачів до комутуючих пристроїв, компенсаторів вібрацій і мікро-роботів. Незважаючи на те, що п'єзоефект був відкритий ще в XIX столітті, а з другої половини XX активно розвивалася теорія і технологія створення п'єзокерамічних матеріалів, вважається, що п'єзокераміка - один з перспективних матеріалів XXI століття.

1.1. Система матеріалів для п'єзотроніки і п'єзофототроніки

Одномірні наноматеріали, такі як нанодроти і нанострічки, ідеально підходять для п'єзотроніки і п'єзофототроніки, оскільки вони можуть витримувати великі механічні навантаження. ZnO, GaN, InN і, можливо, леговані матеріали PZT є потенційними кандидатами для п'єзотроніки. В даний час найбільш популярною структурою є нанодріт ZnO за трьома основними причинами. По-перше, його можна легко вирощувати в великих кількостях, використовуючи паро-твердий процес або хімічний підхід при низькій температурі. По-друге, такі нанодроти біологічно сумісні і екологічно чисті. Нарешті, вони можуть бути вирощені на підкладці і будь-якій формі підкладки. Зростання твердої речовини в парах зазвичай відбувається в трубчастій печі шляхом випаровування порошків ZnO в присутності вуглецю при температурі близько 900°C. Візерункове зростання можливе при введенні каталізатора Au.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.2. П'єзотроніка

Вплив п'єзопотенціалу на контакт метал-напівпровідник

Коли метал і напівпровідник n-типу утворюють контакт, на межі розподілу створюється бар'єр Шоткі ($e\phi_{SB}$), якщо робота виходу металу помітно більше, ніж близькість електрону до напівпровідника (рис. 1.2а). Струм може проходити через цей бар'єр тільки в тому випадку, якщо прикладена зовнішня напруга більше порогового значення (ϕ_i) і його полярність позитивна на металевій стороні (для напівпровідника n-типу). Якщо на межі розподілу застосовано збудження фотону, нові електрони, що генеруються в зоні провідності, прагнуть відійти від контакту, тоді як дірки прагнуть наблизитися до межі розподілу до металевої сторони. Накопичені дірки на межі розподілу змінюють профіль локального потенціалу, так що ефективна висота бар'єру Шоткі знижується (рис. 1.2б), що збільшує провідність.

Як тільки в напівпровіднику, що також володіє п'єзоелектричними властивостями, створюється деформація, негативний п'єзопотенціал на стороні напівпровідника ефективно збільшує локальну висоту бар'єру Шоткі до експоненти (рис. 1.2в), в той час як позитивний п'єзопотенціал зменшує висоту бар'єру. Роль п'єзопотенціалу полягає в тому, щоб ефективно змінювати локальні контактні характеристики через внутрішнє поле в залежності від кристалографічної орієнтації матеріалу і знаку деформації. Таким чином, процес перенесення носія налаштовується / контролюється на контакті метал-напівпровідник (М-Н/п). Розглядаючи зміну полярності п'єзопотенціалу шляхом перемикання деформації з розтягування на стиск, характеристики локального контакту можна налаштовувати і регулювати величиною деформації і знаком деформації. [14, 23] Отже, перенесення заряду через поверхню розподілу може бути в значній мірі продиктоване створеним п'єзопотенціалом, який виконує роль затвору. Це основа п'єзотроніки.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З іншого боку, якщо ми порушуємо контакт М-Н/п фотонами, енергія яких перевищує ширину забороненої зони напівпровідника, електронно-діркові пари генеруються поблизу контакту. Наявність вільних носіїв на межі розподілу може ефективно зменшити висоту бар'єру Шоткі. Отже, п'єзопотенціал може збільшувати локальну висоту бар'єру, тоді як лазерне збудження може ефективно зменшувати локальну висоту бар'єру. Два ефекти можуть бути застосовані взаємодоповнюючим чином для управління областю заряду, що утворює зону виснаження заряду.

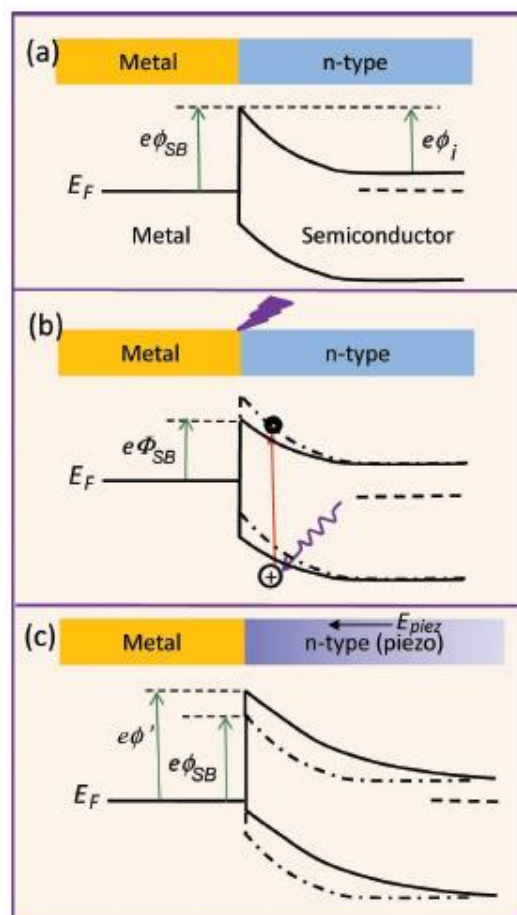


Рисунок 1.2. Діаграма енергетичної зони для ілюстрації впливу лазерного збудження і п'єзоелектрики на поверхню контакту метал-напівпровідник з контактом Шоткі. (А) Зонна діаграма на межі розподілу М-Н/п з контактом Шоткі. (Б) Зонна діаграма на контакті Шоткі після збудження лазером із енергією фотона, яка перевищує ширину забороненої зони, що еквівалентно зменшенню висоти бар'єру Шоткі. (В) Зонна діаграма на контакті Шоткі

після прикладення напруги в напівпровіднику. П'єзопотенціал, створений в напівпровіднику, низький, і має полярність у кінці в з'єднанні з металом.

Наявність такої вільної від носіїв зони може значно посилити п'єзоелектричний ефект, оскільки п'єзо-заряди будуть в основному зберігатися без екранування локальними залишковими вільними носіями. Для випадку, коли сторона р-типу є п'єзоелектрична і прикладена деформація, локальні кінцеві негативні п'єзо-заряди зберігаються на стику (в переході) за умови, що легування відносно мале, так що локальних вільних носіїв недостатньо щоб повністю екранувати п'єзо-заряди. П'єзопотенціал має тенденцію злегка піднімати локальну смугу і вносити повільний нахил в структуру смуги. [7] В іншому випадку, якщо прикладена деформація перемикається в знак, позитивні п'єзо-заряди на межі розподілу створюють провал в локальній смузі.

Модифікація в локальній смузі може бути ефективною для захоплення дірок, так що швидкість рекомбінації електронних дірок може бути значно збільшена, що дуже корисно для підвищення ефективності світлодіоду. Крім того, похила смуга має тенденцію змінювати рухливість носіїв, що рухаються в напрямку з'єднання.

Аналогічним чином, якщо сторона n-типу є п'єзоелектричною, аналогічна зміна зонної структури може бути викликана п'єзоелектричним ефектом. Модифікація зонної структури на межі розподілу / з'єднання п'єзоелектричними зарядами вносить деякі фундаментальні зміни в локальну зонну структуру, яка ефективна для управління характеристиками пристрою.

Для р-n-переходу, виконаного з двох матеріалів з чітко різними забороненими зонами, локальні п'єзо-заряди також можуть істотно впливати на профіль смуги, так що перенесення носіїв заряду через інтерфейс буде значно змінений. Тому наявність п'єзо-зарядів на стику(в переході) може бути корисною для деяких оптоелектронних процесів.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. П'єзофототроніка

Присутність локалізованих п'єзоелектричних зарядів у переході (з'єднанні) може істотно вплинути на поведінку носіїв заряду і відповідні оптоелектронні властивості. Це п'єзофототронний ефект, який є наслідком впливу п'єзопотенціалу на генерацію, перенесення, поділ та / або рекомбінацію носіїв заряду в переході (з'єднанні) і являє собою тристоронній зв'язок між п'єзоелектрикою, поведінкою напівпровідника і збудженням фотонів. Тепер ми використовуємо три приклади, щоб проілюструвати п'єзофототронний вплив на сонячний елемент, фотоприймач і світлодіод.

1.3.1. П'єзофототронний ефект в фотодетекторі.

Основний принцип фотонного детектора заснований на фотоелектричному ефекті, в якому пари електрон-дірка, що генеруються фотоном, поділяються або рп-переходом, або SBH. В такому випадку SBH важливий для чутливості виявлення фотонного детектора. Налаштовуючи висоту SB в УФ-датчику на основі дроту ZnO шляхом додавання деформації, ми можемо поліпшити чутливість УФ-детектора, особливо коли інтенсивність освітлення досить слабка.

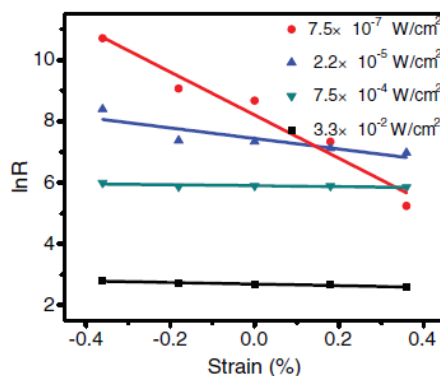


Рисунок 1.3. П'єзофототронний вплив на квантовий детектор. Підвищення чутливості виявлення фотонів п'єзофототронним ефектом. Чутливість ZnO провідного УФ-детектора (в одиницях A / W) як функція деформації при

різній інтенсивності збуджуючого світла в натуральному логарифмічному масштабі. [6]

Відгук фотоприймача відповідно підвищується на 530%, 190%, 9% і 15% при впливі на провід 4.1, 120.0, 4.1, 180.4 нВт ультрафіолетовим випромінюванням на дроті шляхом введення деформації стискання -0,36% (Рис. 1.3), який ефективно налаштовував висоту SB на контакті з допомогою створеного локального п'єзопотенціалу. [6, 25] Чутливість до слабого світлового освітлення особливо підвищується за рахунок введення напруги, хоча остання практично не впливає на чутливість до сильного світлового освітлення. Наші результати показують, що п'єзофототронний ефект може збільшити чутливість виявлення більш ніж в п'ять разів для виявлення світла з pW рівнями потужності.

1.3.2. Теорія п'єзофототроніки

Розроблена теоретична структура п'єзофототроніки, вивчено випромінювання фотонів на pn -переході і детекторі фотонів в присутності локальних п'єзоелектричних зарядів. [26, 27] Аналітичні результати в спрощених умовах отримані для розуміння основної фізики п'єзофототронних пристроїв, а також розроблені чисельні моделі для ілюстрації процесу фотонної емісії та транспортних характеристик носія п'єзоелектричного світлодіоду в практичному випадку. Теоретичні результати підтверджують експериментальні дані і наші фізичні картини для п'єзофототроніки. Теорія не тільки встановлює міцний фізичний фон п'єзофототроніки, але також забезпечує теоретичну підтримку для керівництва експериментальним дизайном.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Висновки і перспективи

З використанням вюрцитних матеріалів, таких як ZnO, GaN і InN, які одночасно мають п'єзоелектричні і напівпровідникові властивості, ми зв'язали п'єзоелектрику з оптоелектронними процесами збудження і створили кілька нових полів (рис. 1). [7] Основа спирається на п'єзопотенціал, який створюється в п'єзоелектричному матеріалі шляхом прикладання напруги, і він створюється поляризацією іонів в кристалі. П'єзотроніка - це пристрої, виготовлені з використанням п'єзопотенціалу як напруга «затвору» для налаштування / управління перенесенням заряду на контакті або з'єднанні. П'єзофототронний ефект полягає в використанні п'єзопотенціалу для управління генерацією, перенесенням, поділом і / або рекомбінацією носіїв для поліпшення характеристик оптоелектронних пристроїв, таких як фотонний детектор, сонячний елемент і світлодіод.

П'єзотроніка, ймовірно, буде мати важливе застосування в сенсорах, взаємодії людини з Si електронікою, MEMS, нано-робототехніці і активній гнучкій електроніці. Ми очікуємо в найближчому майбутньому застосування п'єзотроніки і п'єзофототроніки в сенсорних мережах, біо-науці, людинно-машинному інтерфейсі і інтеграції, а також в енергетиці.

В главі проаналізовано конструкції п'єзоелектричних перетворювачів; функціональне призначення складових п'єзоелектричного перетворювача; етап розробки конструкції п'єзоелектричного перетворювача.

2. Експериментальна частина.

2.1. Технологія осадження плівок групи А2В6 та технологічне обладнання.

Проведений практичний експеримент по вирощуванню п'єзоплівки у лабораторії. Описуємо даний процес поетапно: зібрана структура розміщується в спеціальному кварцовому стакані (рис. 2.2) - колбі, всередині якої сформований квазізамкнутий простір, де відбувається процес напилення. Від колби, знизу, йдуть два кварцових трубки-відростки, всередину яких поміщається напилюваний порошок (в нашому випадку ZnS і CdS). Кварцова колба встановлюється в спеціальне посадкове місце установки, накривається графітово-молібденовим екраном, і вся конструкція герметично закривається ковпаком. За допомогою двох насосів електродвигуна під ковпаком створюється і підтримується вакуум — $2\cdot 3\cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.



Рис. 2.1. Кварцовий стакан – фото.

Після створення вакууму виконується процес нагріву безпосередньо самого ситалу, кварцової колби, та двох відростків. Для цього використовують чотири термопари (рис. 2.4). На рис. а видно як підводяться нагрівачі до основи і відростків колби, б – до ситалу.



Рис. 2.2. Термопары

Повний процес, включаючи нагрів, напilenня та охолодження установки – займає 100 хвилин, із них:

1. Ситал знаходиться 25 хвилин в проміжку 196-228 °С
2. Камера – 44-45 хвилин в проміжку 550-554 °С
3. ZnS – 25 хвилин підтримується при температурі 546-577 °С, після чого вона піднімається до температури напilenня, і на протязі 10 хвилин знаходиться в проміжку 850-854 °С.
4. CdS – 39-40 хвилин напильється при температурі 780-783 °С.

Мікропроцесорний модуль Tritan 6000 перетворює показники чотирьох термопар і виводить їх на екран графіком температурно-часової залежності. Із охолодженої установки отримуємо зібрану конструкцію вже із напиленими шарами ZnS и CdS на молибден, після чого вона відправляється в схожу за принципом роботи установку, де так само під високим вакуумом відбувається нанесення контактної бази.

Висновки

Детально вивчено вакуумне обладнання для осадження плівок А2В6, зроблено креслення цього обладнання та вивчено технологічний маршрут осадження плівок.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРП 171.081.007 ПЗ

Арк.

20

2.2. Виміри електричних параметрів та вольт-амперних характеристик структур

Отримані в результаті осадження структури були досліджені за результатами вимірів вольт-амперних характеристик при увімкненому та вимкненому світлодіоді, без тиску / при прикладанні тиску до структури / при скручуванні. ВАХ знімалися за допомогою зібраної власноруч вимірювальної установки, представленою на рис. 2.3.

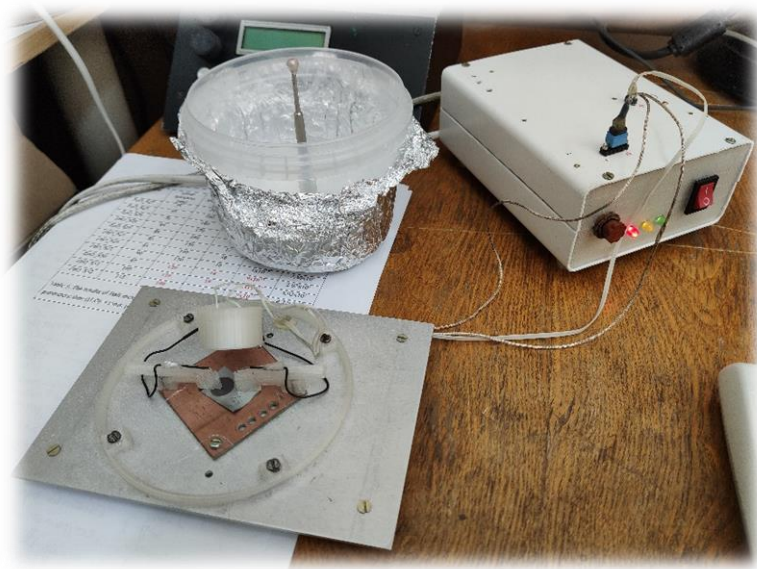


Рис. 2.3. Фото вимірювальної установки із джерелом живлення світлодіоду та екрануючим циліндром із стержнем-основою для прикладення тиску.

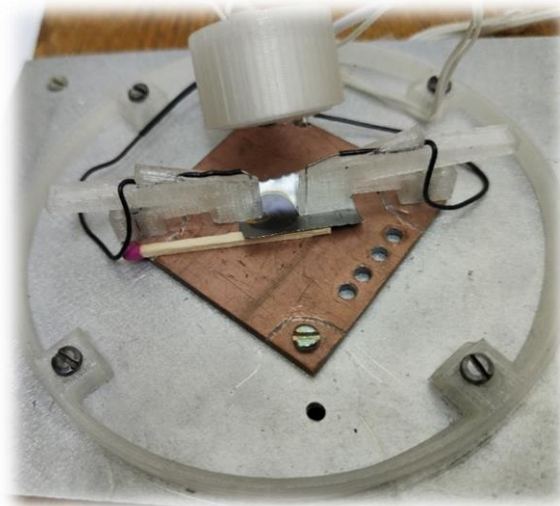


Рис. 2.4. Фото процесу скручування досліджуваного зразку.

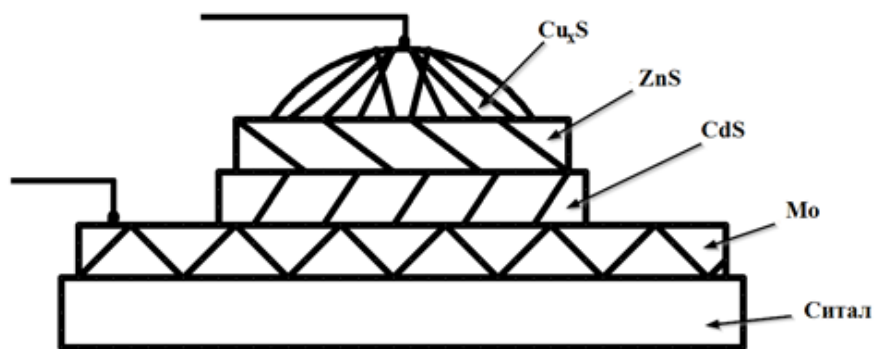


Рис. 2.5. Схематичне зображення отриманих та досліджених структур.

Отримані ВАХ представлено на рисунках 2.6-2.32. ВАХ мають вигляд діодних характеристик, що є показником того, що сформовано випрямний бар'єр між осадженими плівками n-типу та р-типу провідності, а оскільки ті матеріали різні, то ми маємо гетероструктуру. На представлених ВАХ видно, що гілка при прямому зміщенні реагує на прикладений тиск і світло.

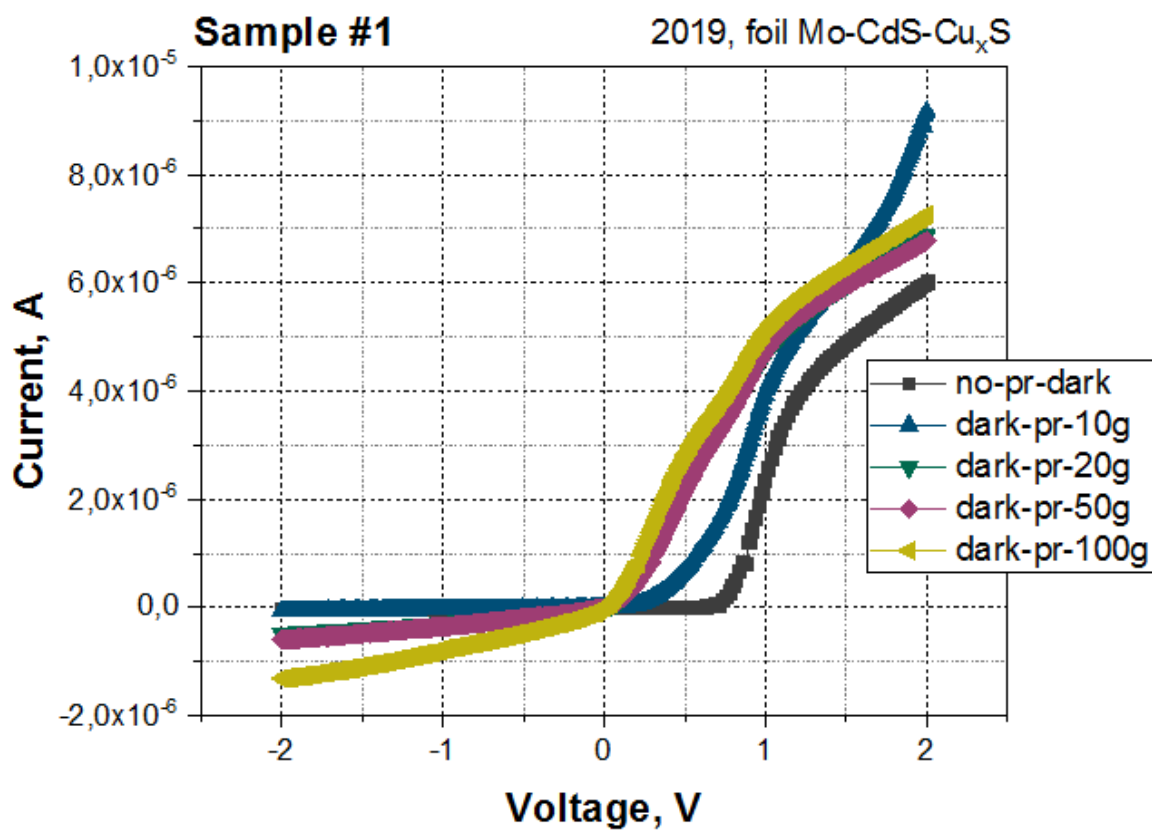


Рис. 2.6. ВАХ для зразку №1 в темновому режимі.

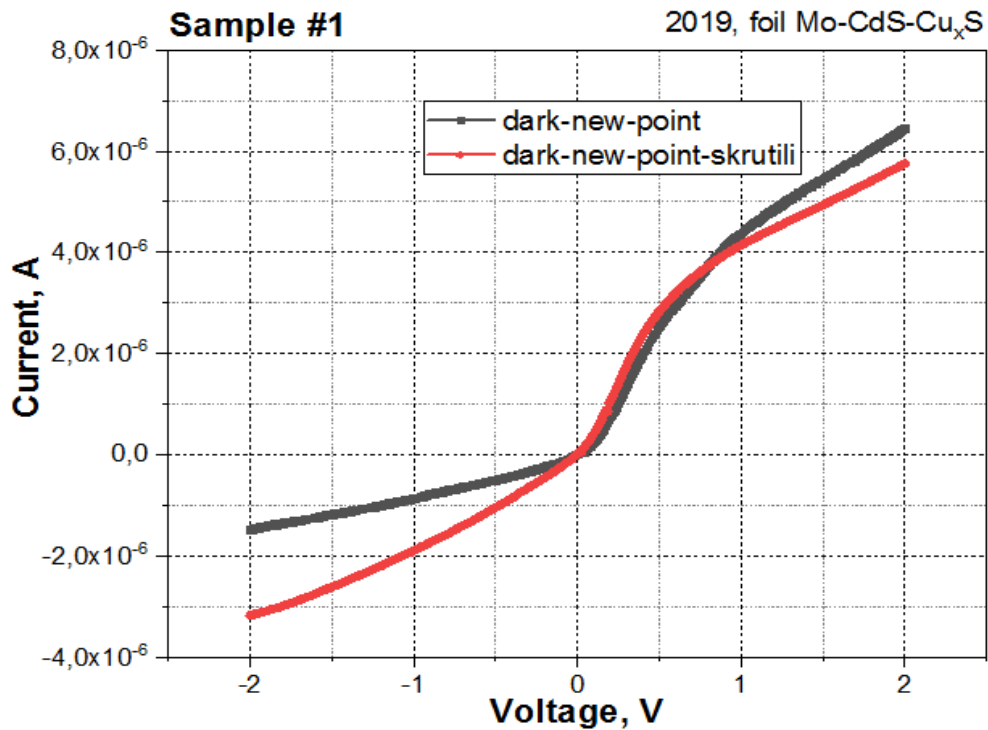


Рис. 2.7. ВАХ для зразку №1 в темновому режимі скручування.

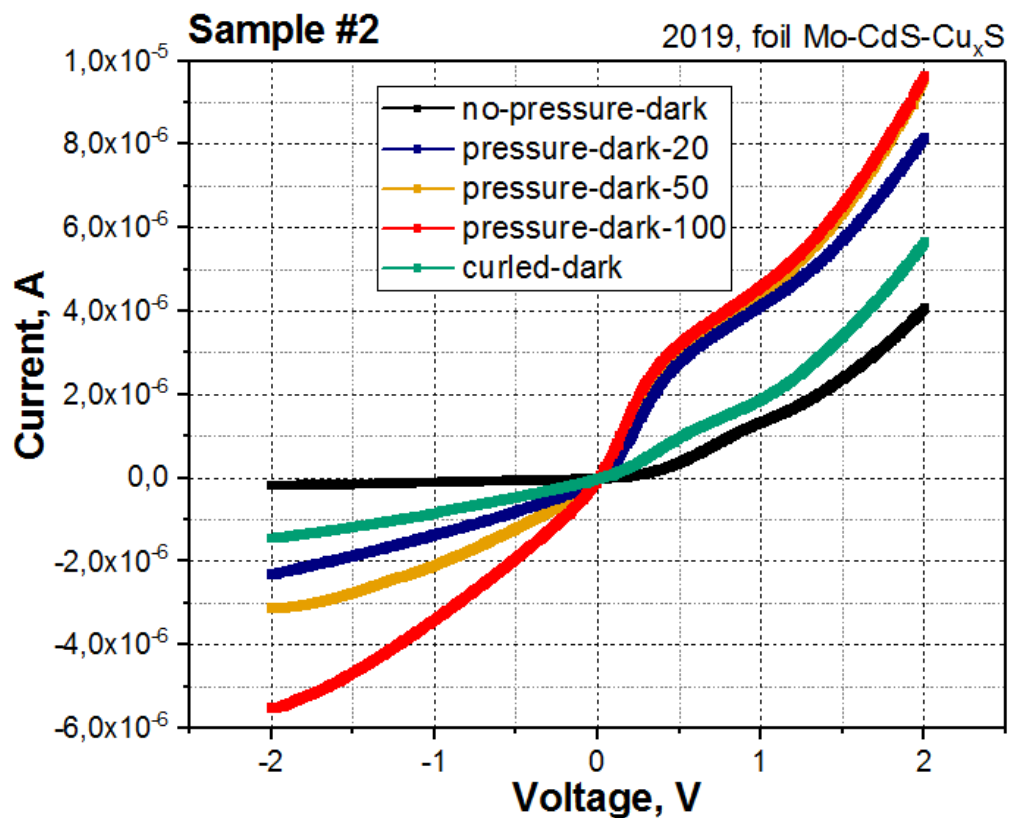


Рис. 2.8. ВАХ для зразку №2 в темновому режимі.

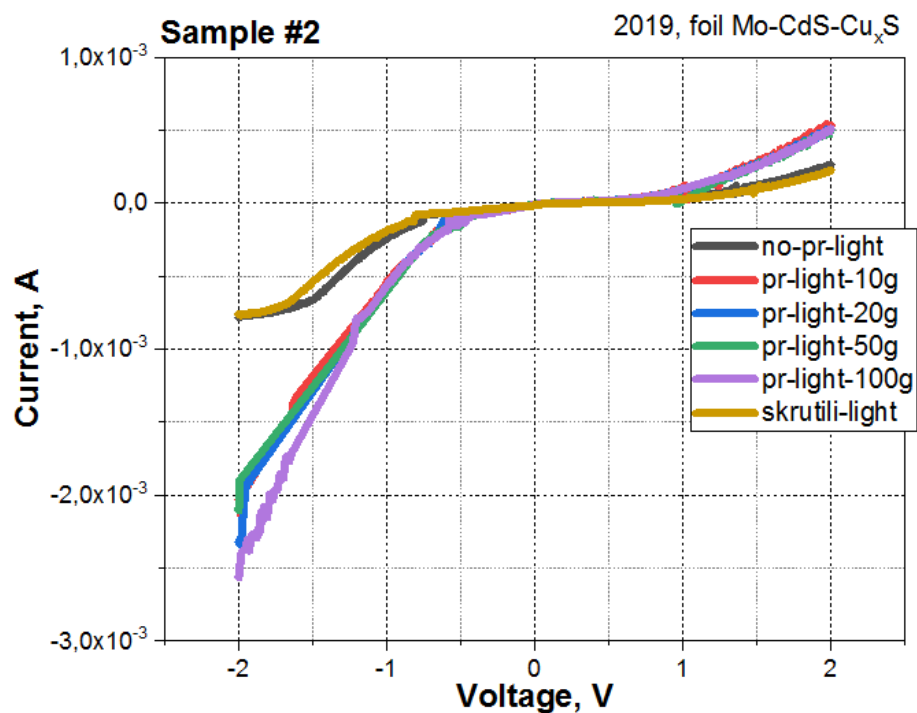


Рис. 2.9. ВАХ для зразку №2 в світловому режимі.

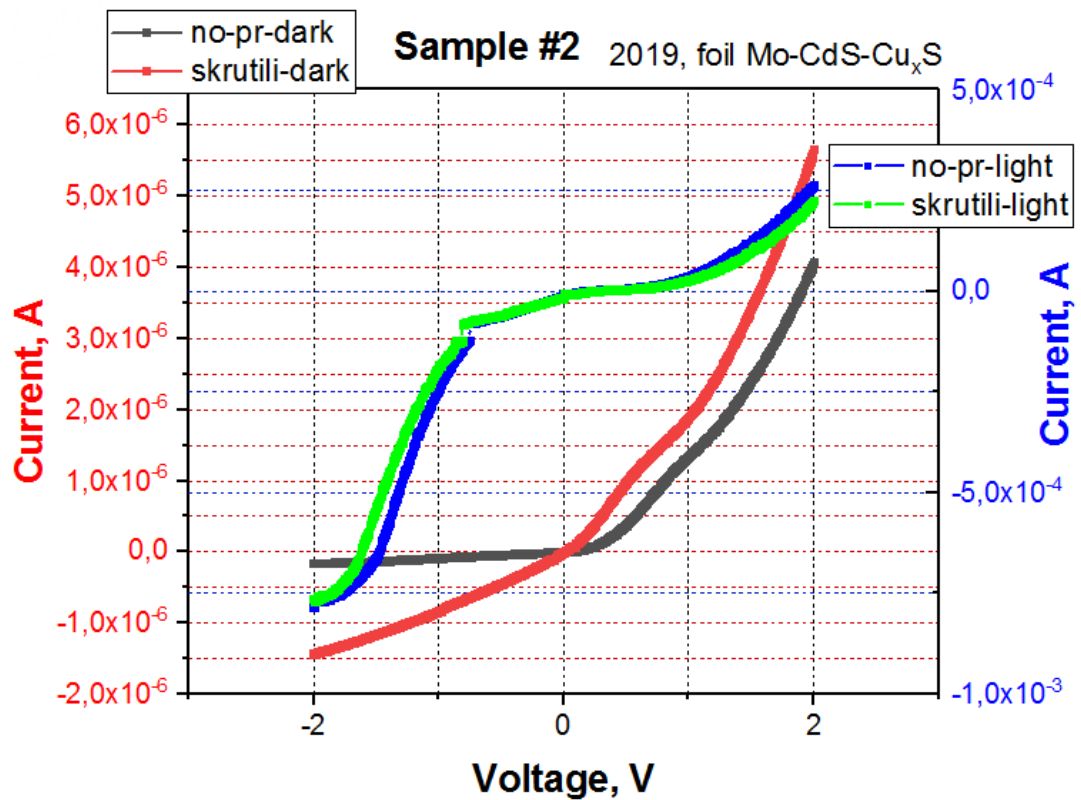


Рис. 2.10. ВАХ для зразку №2 в темновому та світловому режимах скручування.

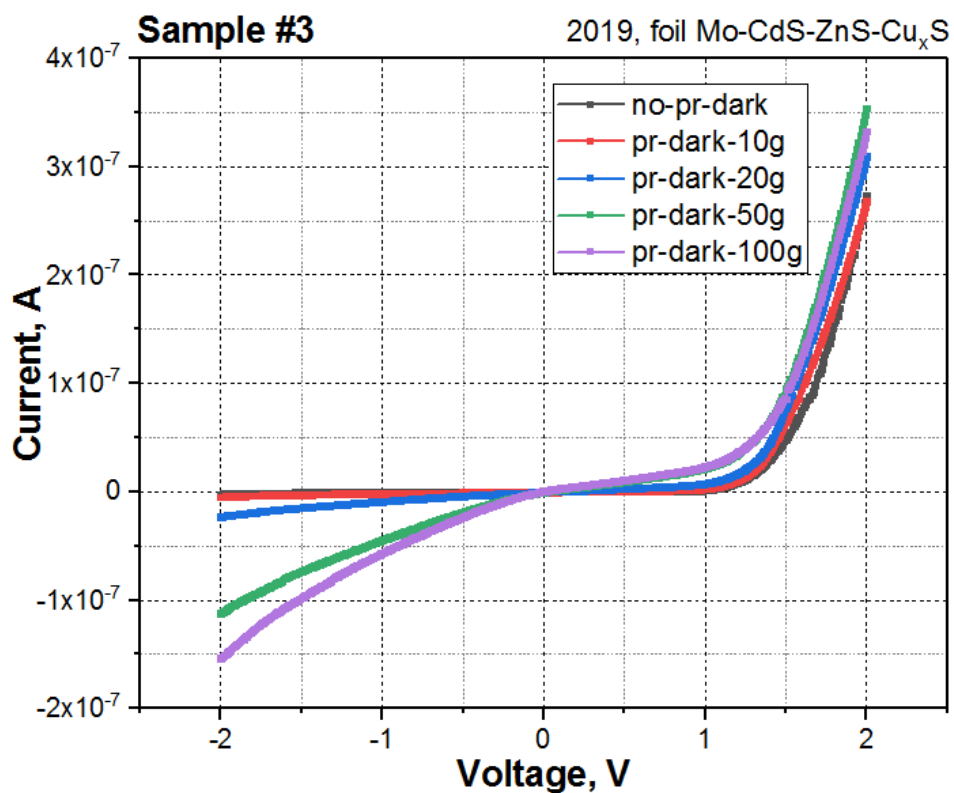


Рис. 2.11. ВАХ для зразку №3 в темновому режимі.

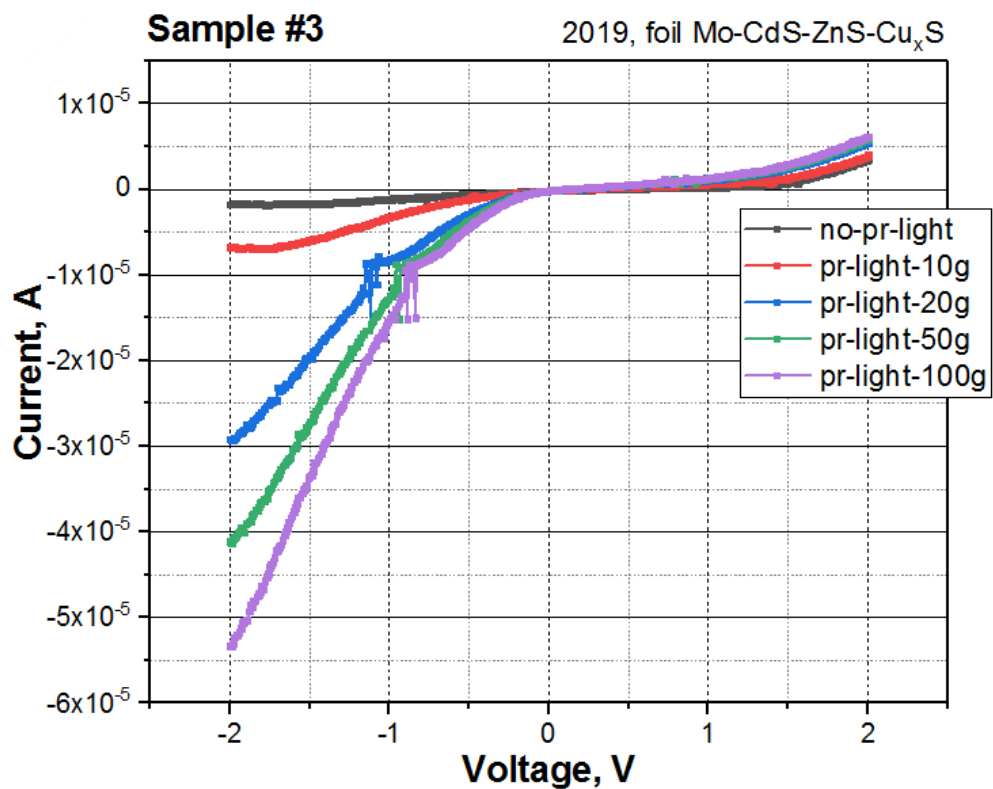


Рис. 2.12. ВАХ для зразку №3 в світловому режимі.

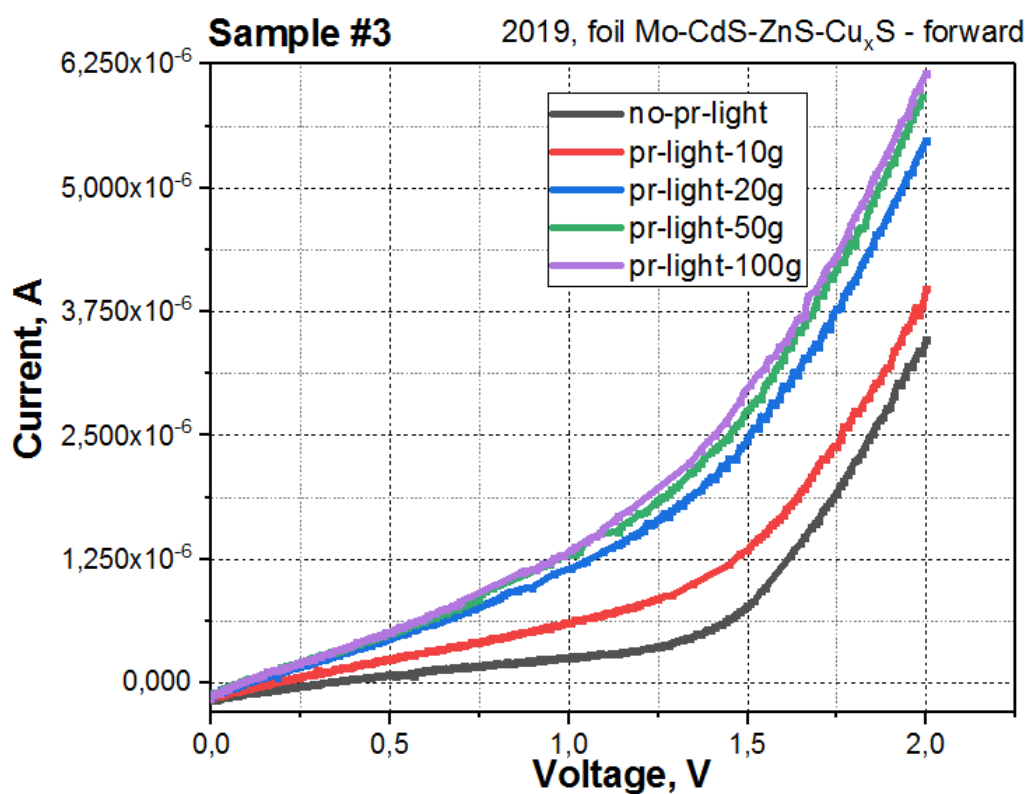


Рис. 2.13. Прямая гілка ВАХ для зразку №3 в світловому режимі.

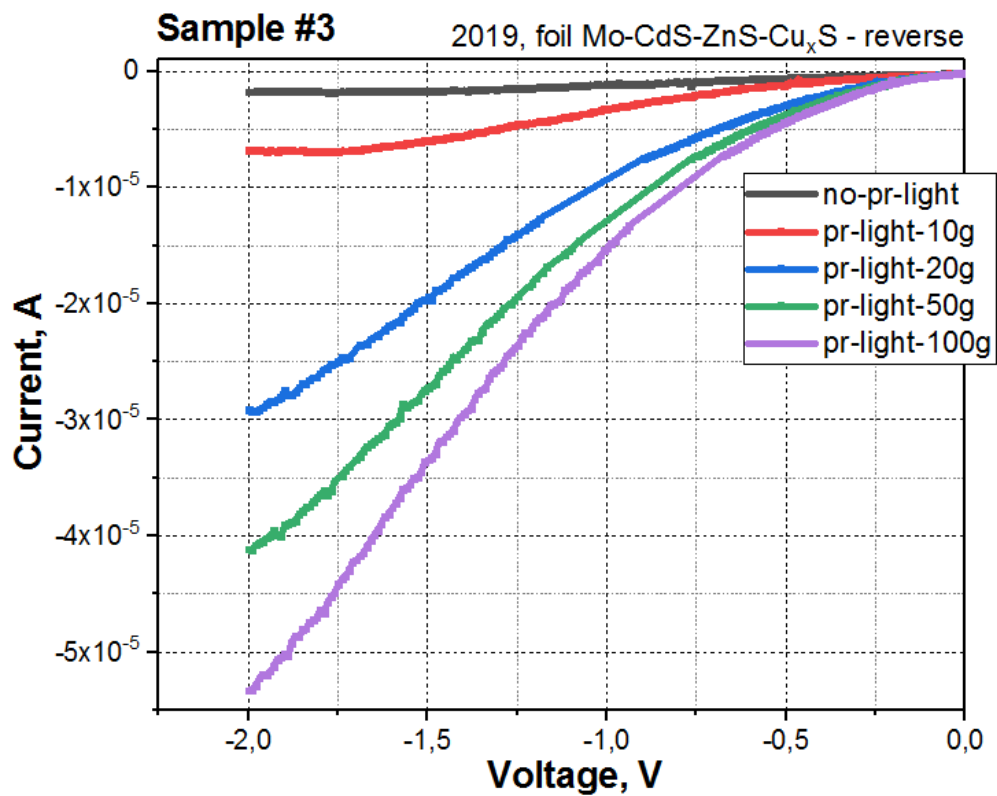


Рис. 2.14. Зворотня гілка ВАХ для зразку №3 в світловому режимі.

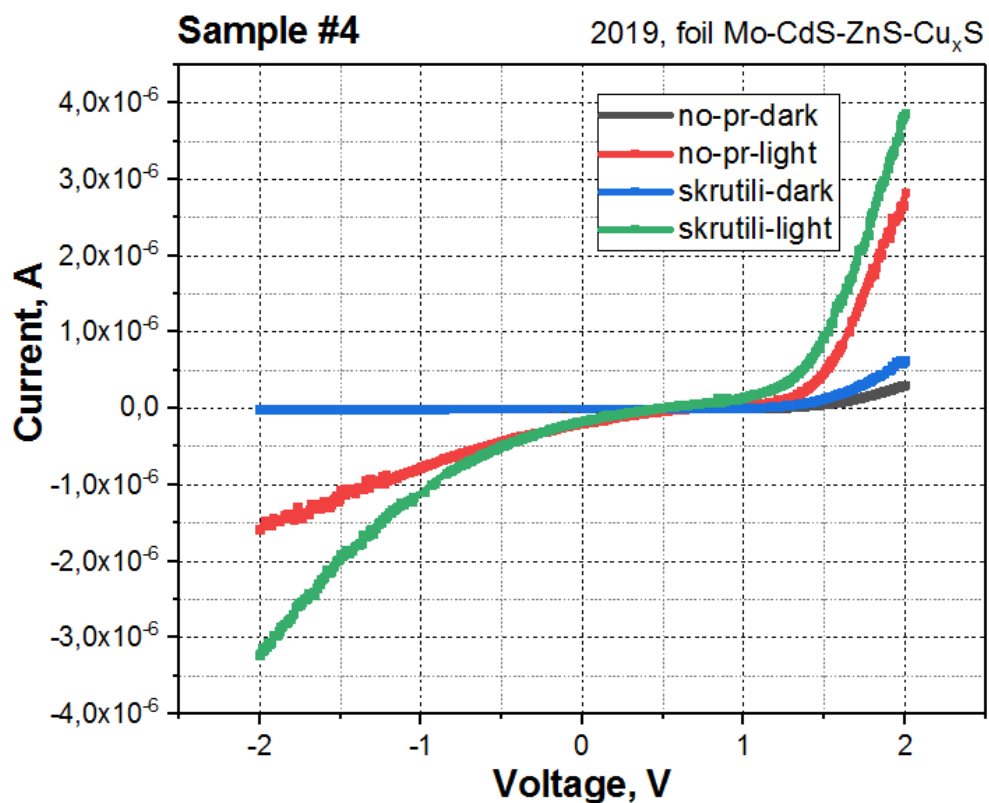


Рис. 2.15. ВАХ для зразку №4 в темновому та світловому режимах скручування.

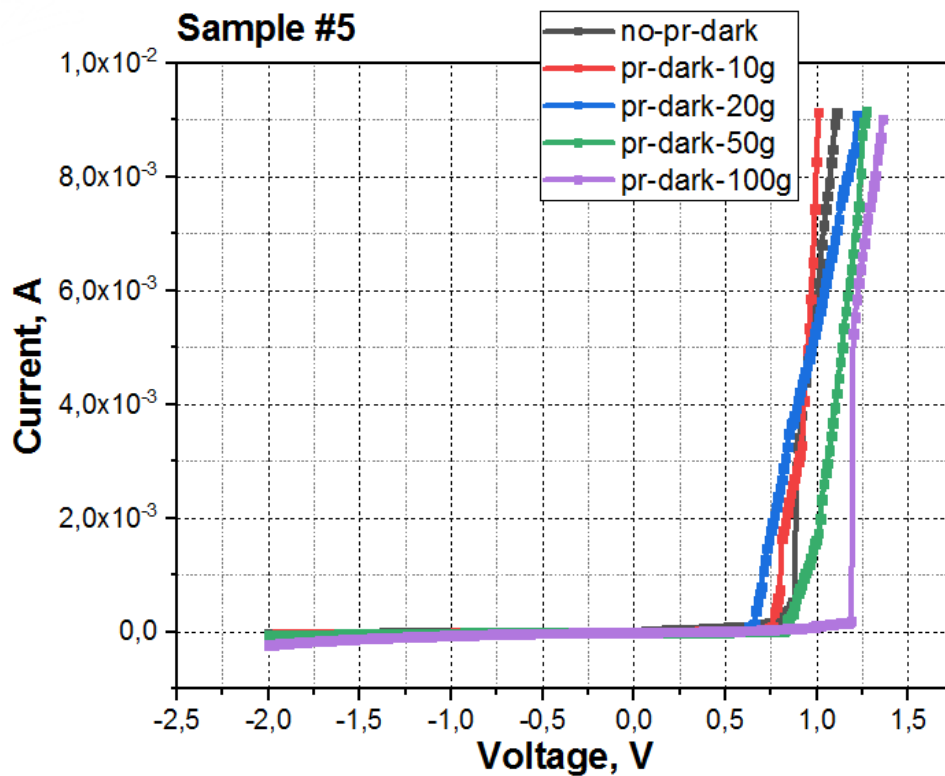


Рис. 2.16. ВАХ для зразку №5 в темновому режимі.

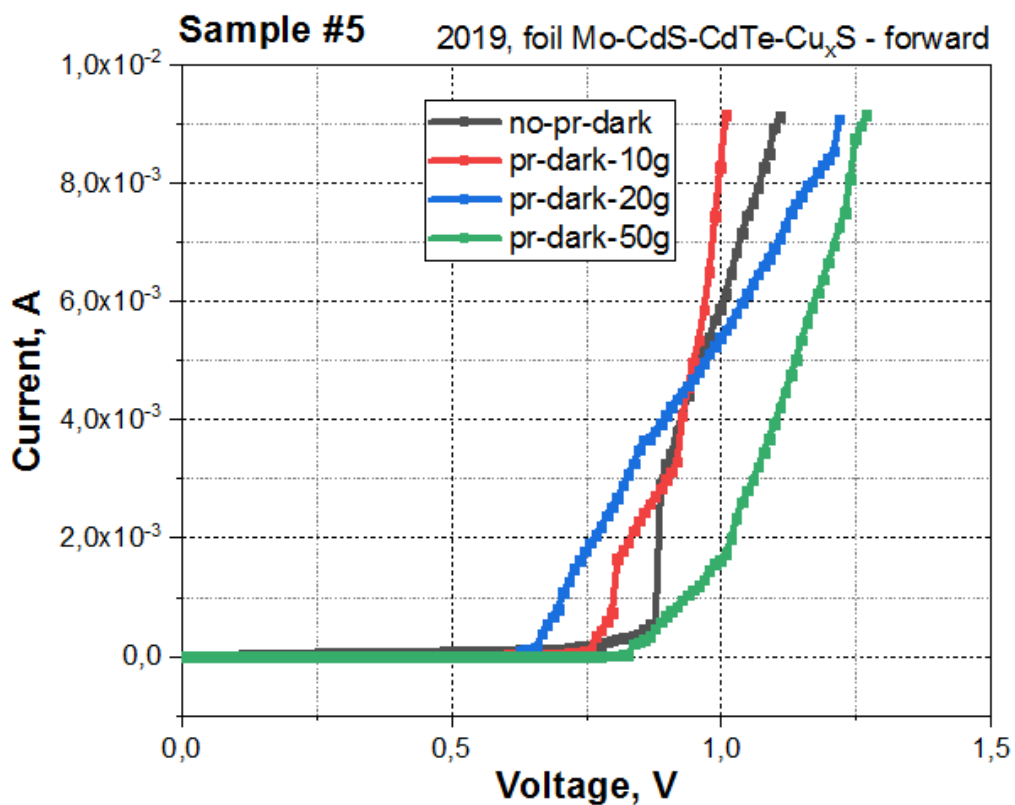


Рис. 2.17. Прямая гілка ВАХ для зразку №5 в темновому режимі.

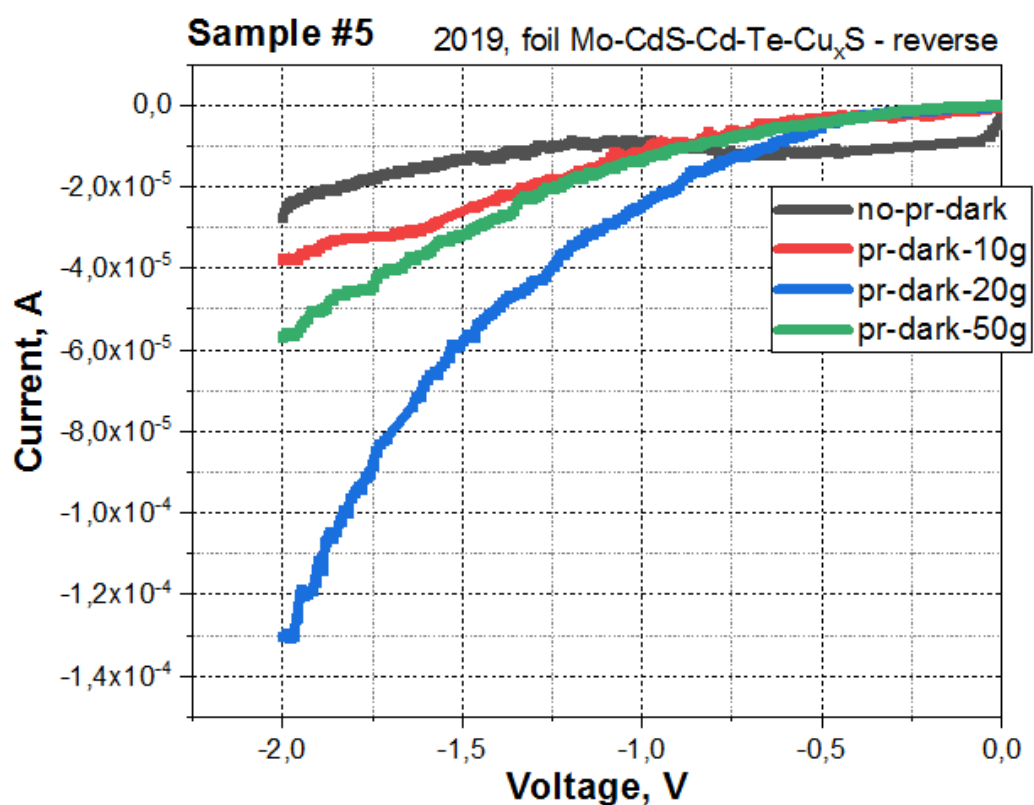


Рис. 2.18. Зворотня гілка ВАХ для зразку №5 в темновому режимі.

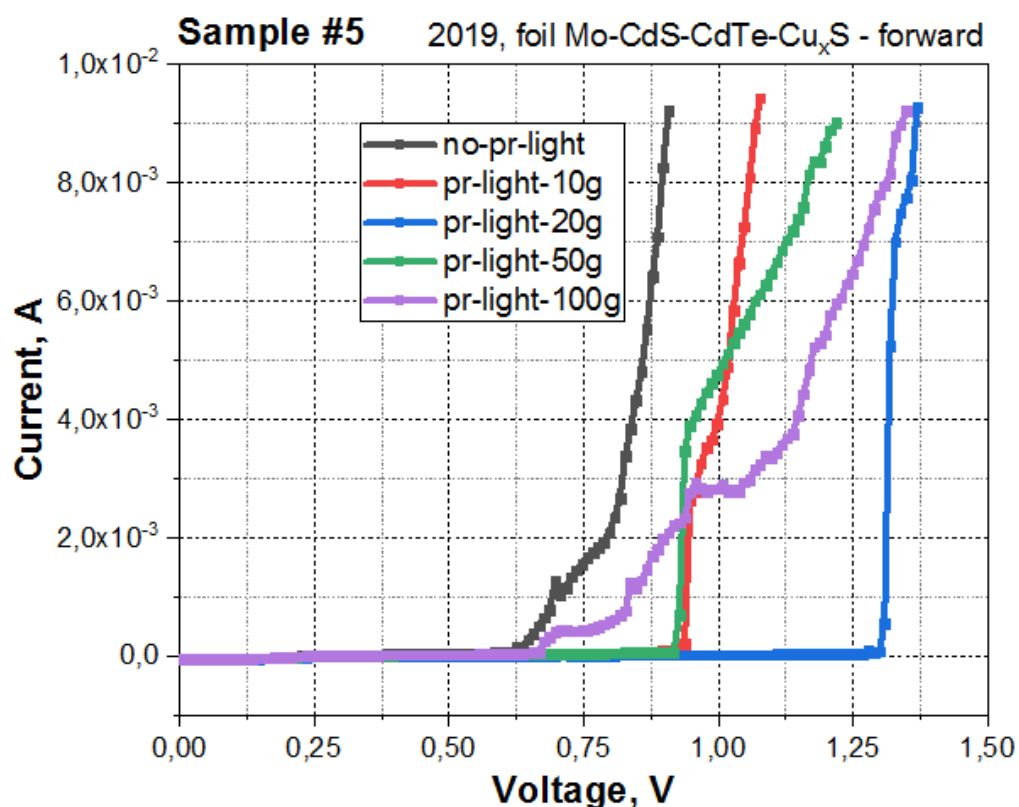


Рис. 2.19. Прямая гілка ВАХ для зразку №5 в світловому режимі.

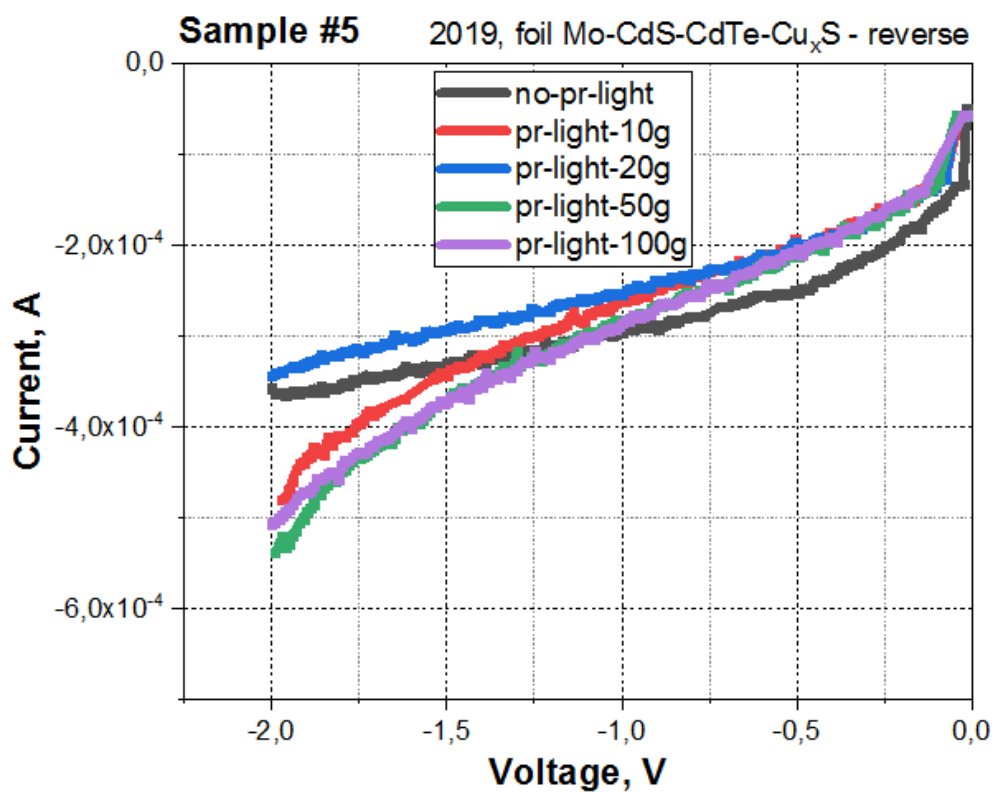


Рис. 2.20. Зворотня гілка ВАХ для зразку №5 в світловому режимі.

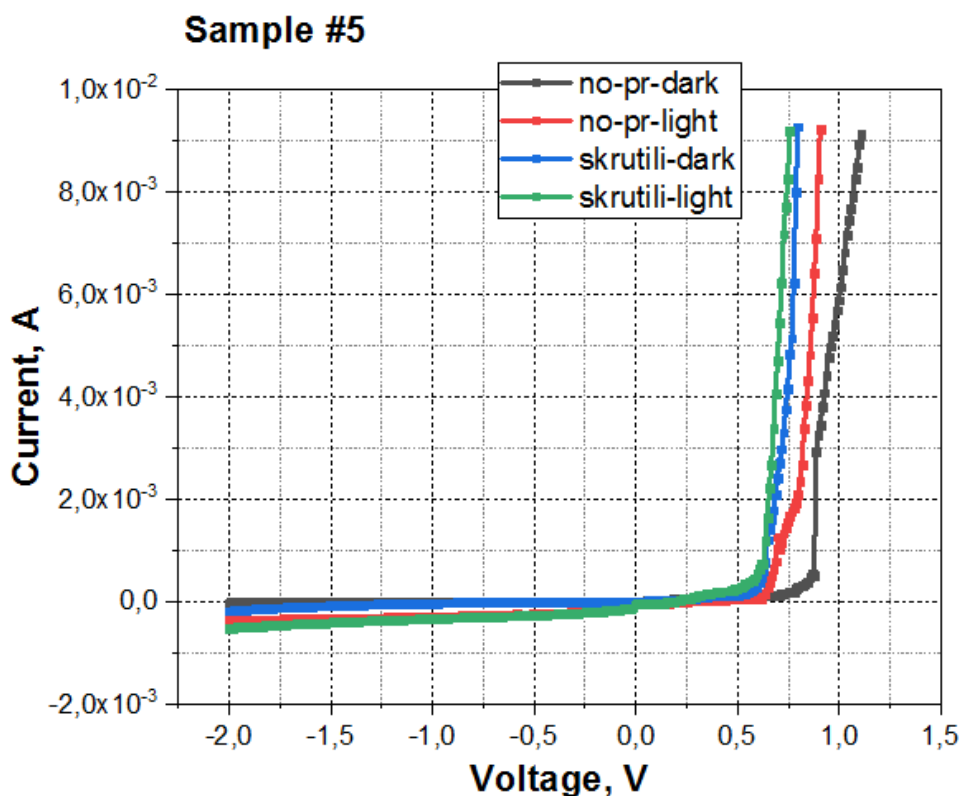


Рис. 2.21. ВАХ для зразку №5 в темновому і світловому режимах скручування.

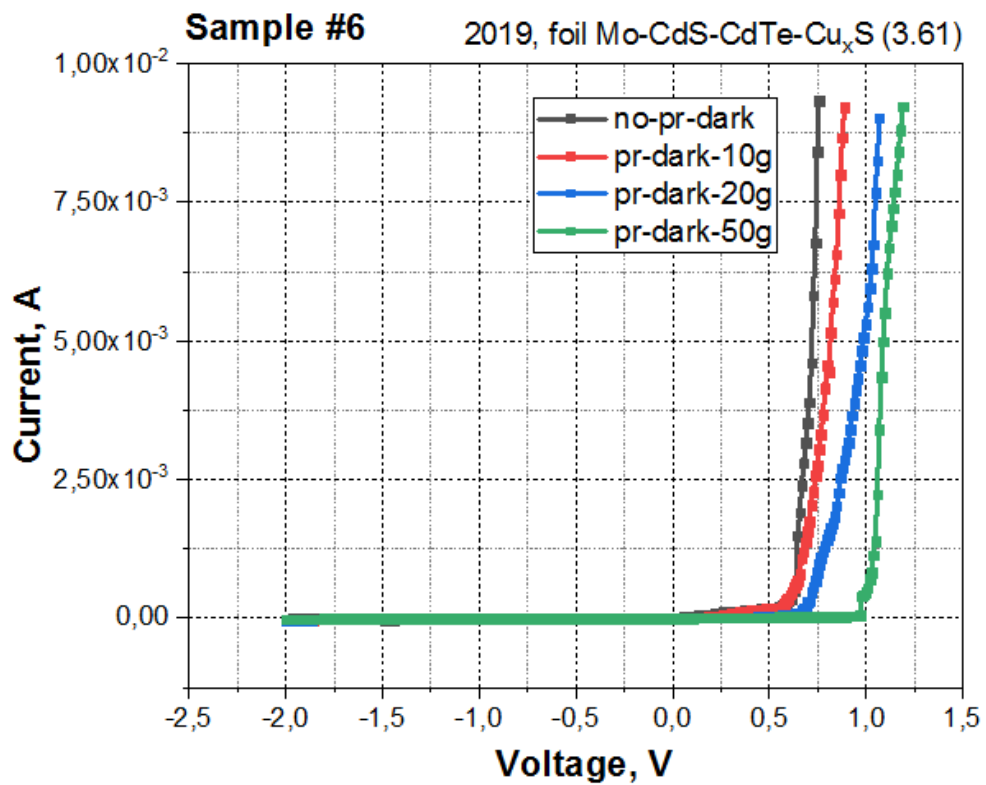


Рис. 2.22. ВАХ для зразку №6 в темновому режимі.

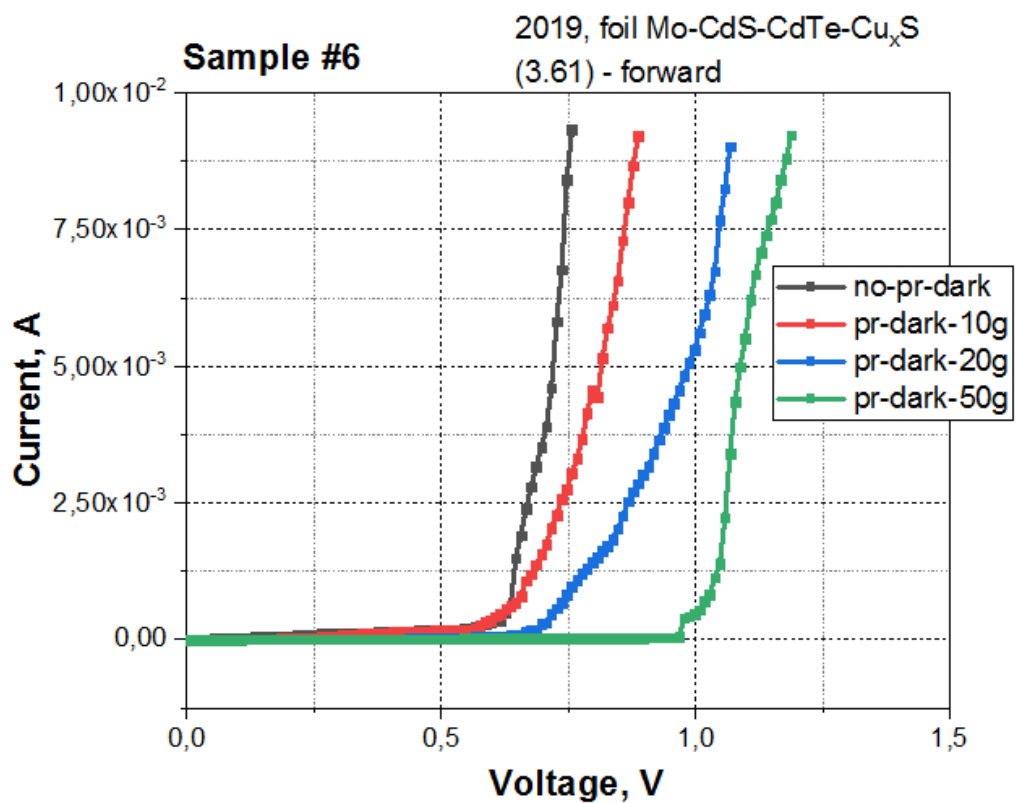


Рис. 2.23. Прямая гілка ВАХ для зразку №6 в темновому режимі.

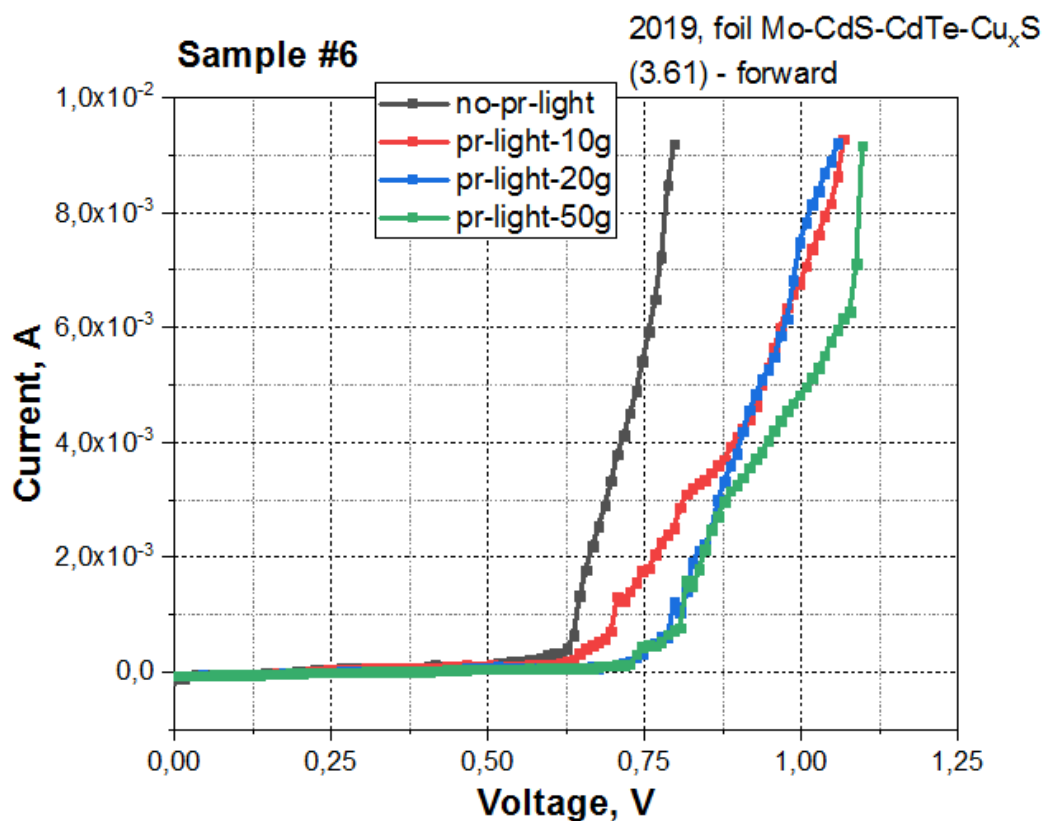


Рис. 2.24. Прямá гíлка ВАХ для зразку №6 в світловому режимі.

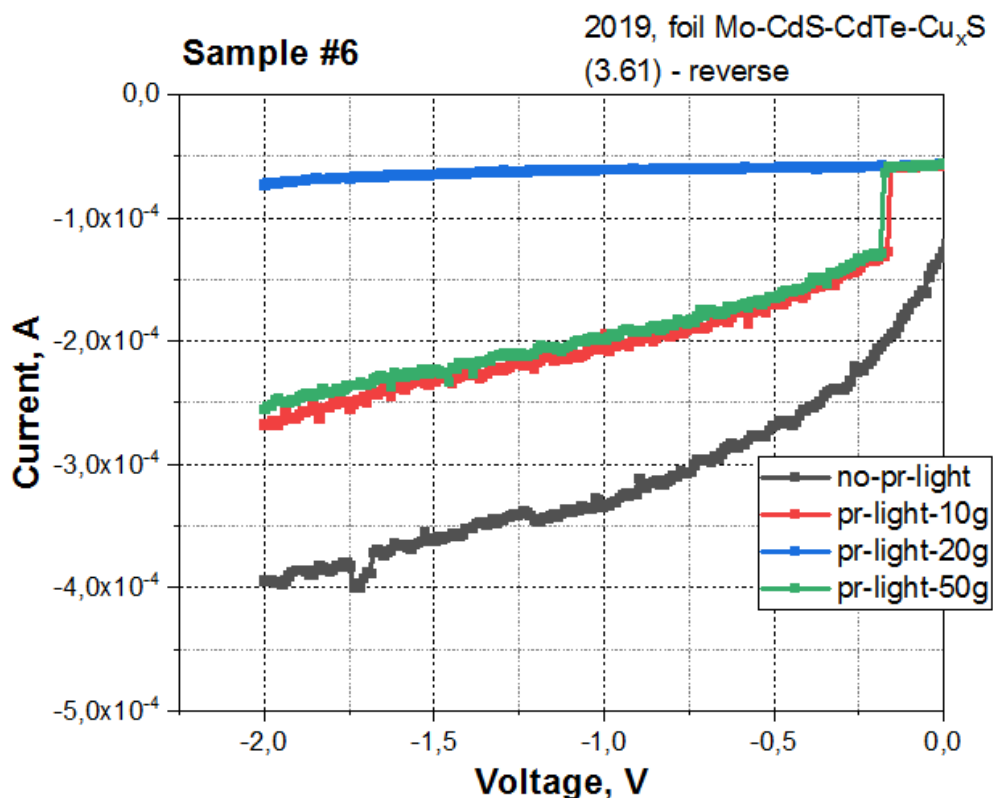


Рис. 2.25. Зворотня гíлка ВАХ для зразку №6 в світловому режимі.

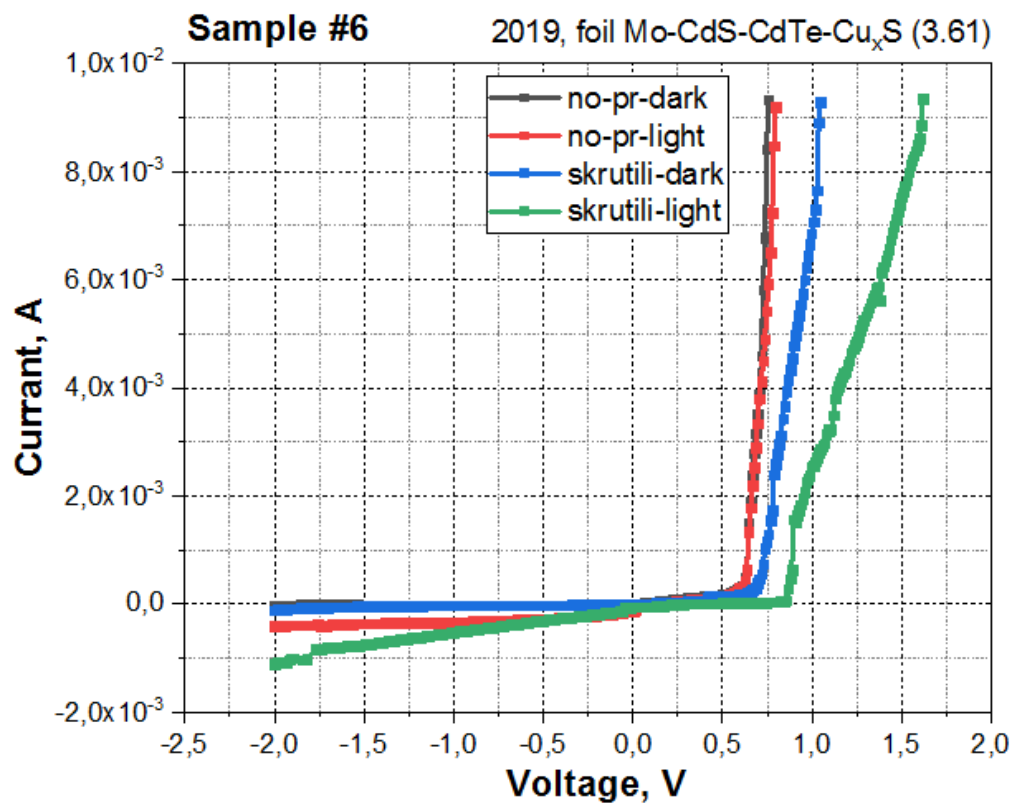


Рис. 2.26. ВАХ для зразку №6 в темновому і світловому режимах скручування.

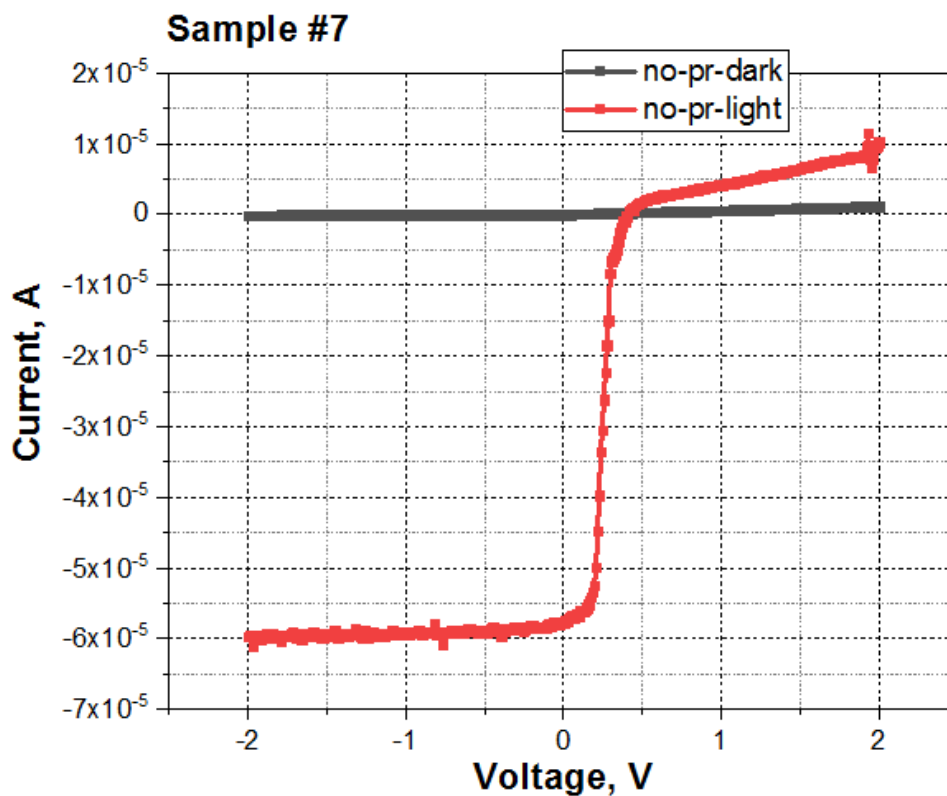


Рис. 2.27. ВАХ для зразку №7.

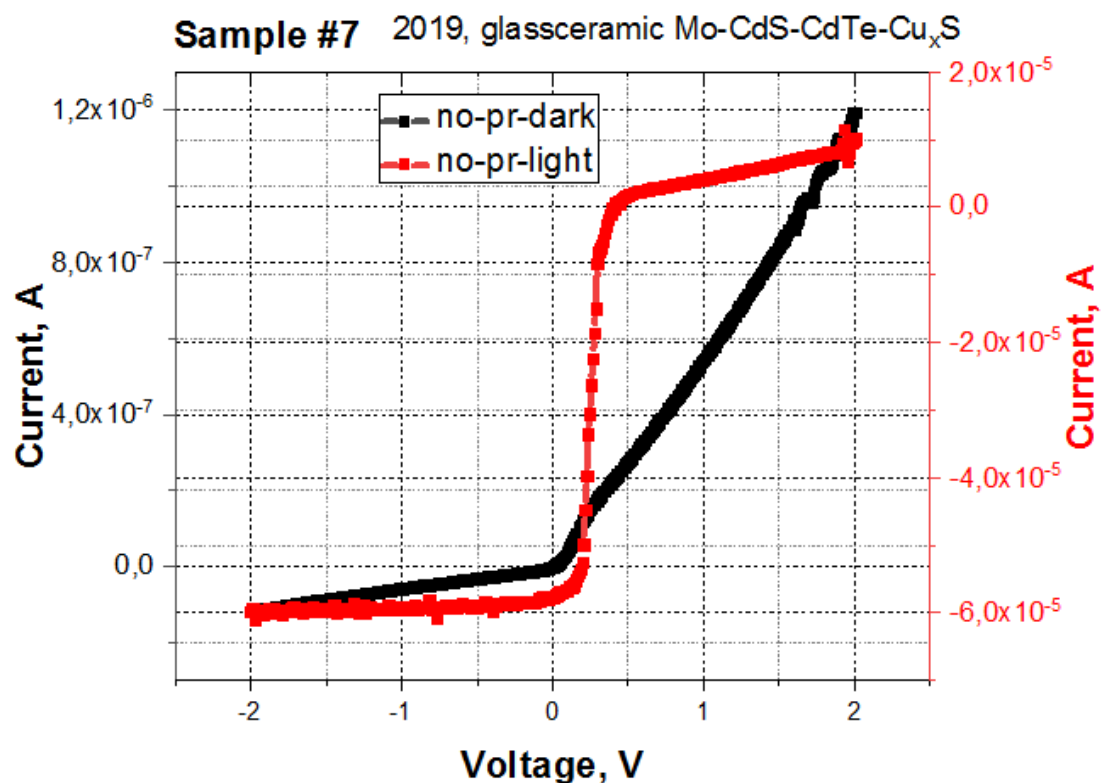


Рис. 2.28. ВАХ для зразку №7 в подвійному масштабі.

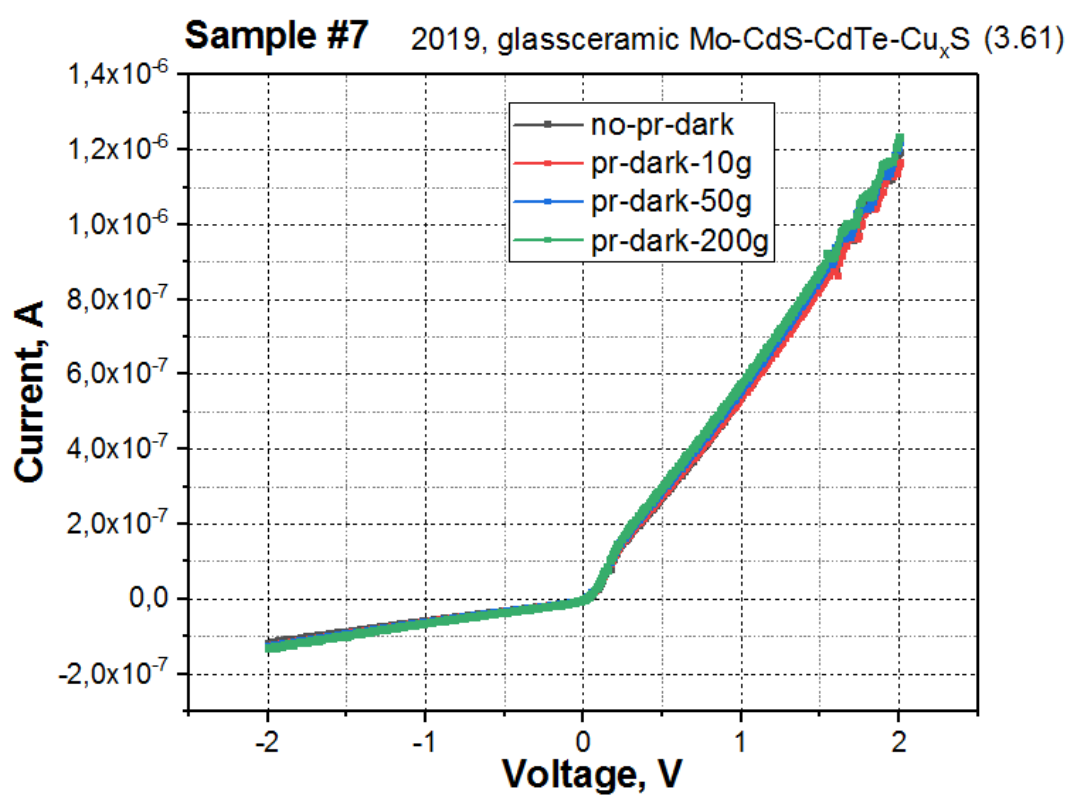


Рис. 2.29. ВАХ для зразку №7 в темновому режимі.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРП 171.081.007 ПЗ

Арк.

34

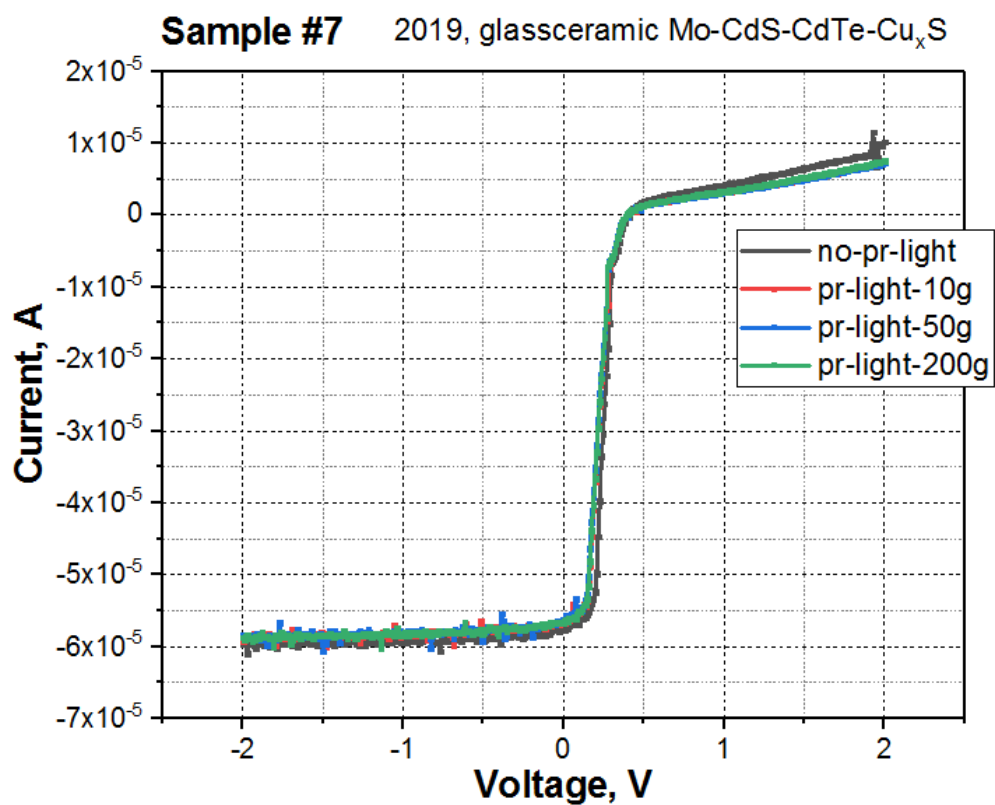


Рис. 2.30. ВАХ для зразку №7 в світловому режимі.

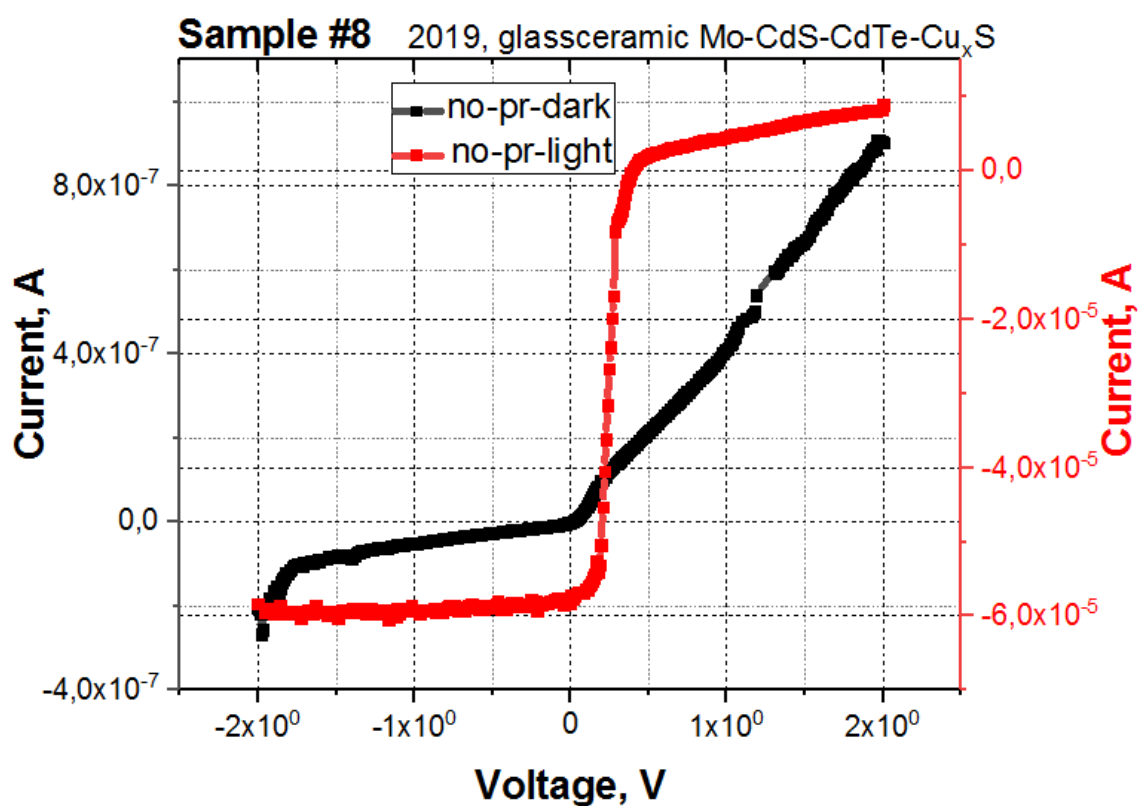


Рис. 2.31. ВАХ для зразку №8 в подвійному масштабі.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРП 171.081.007 ПЗ

Арк.

35

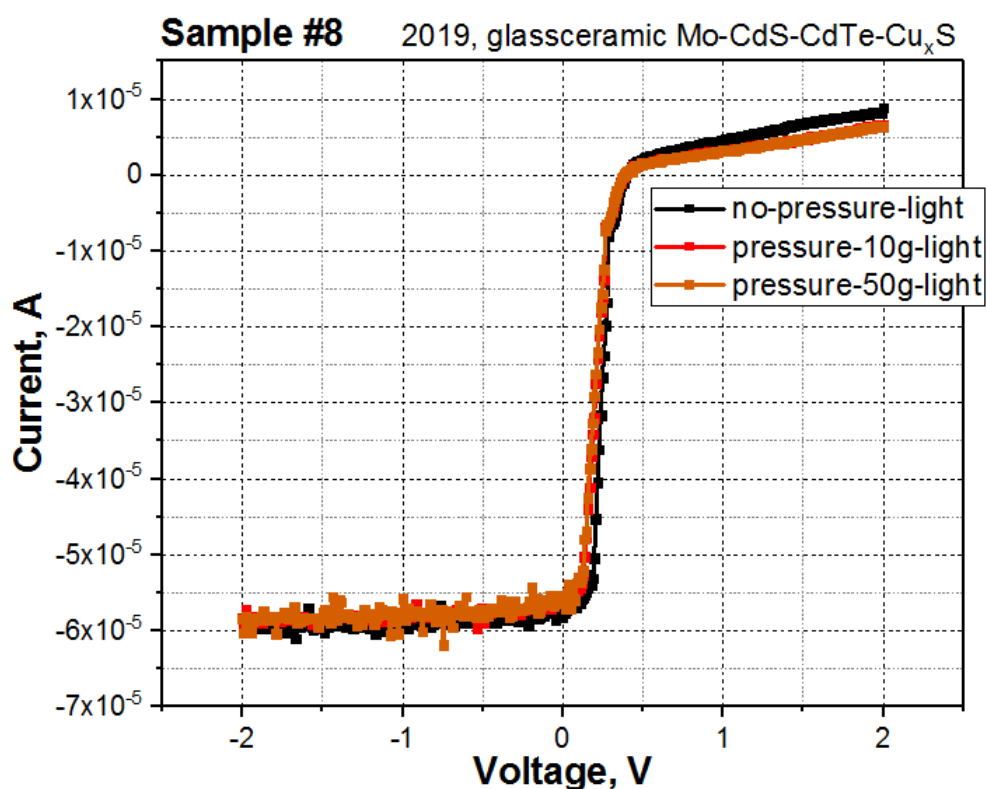
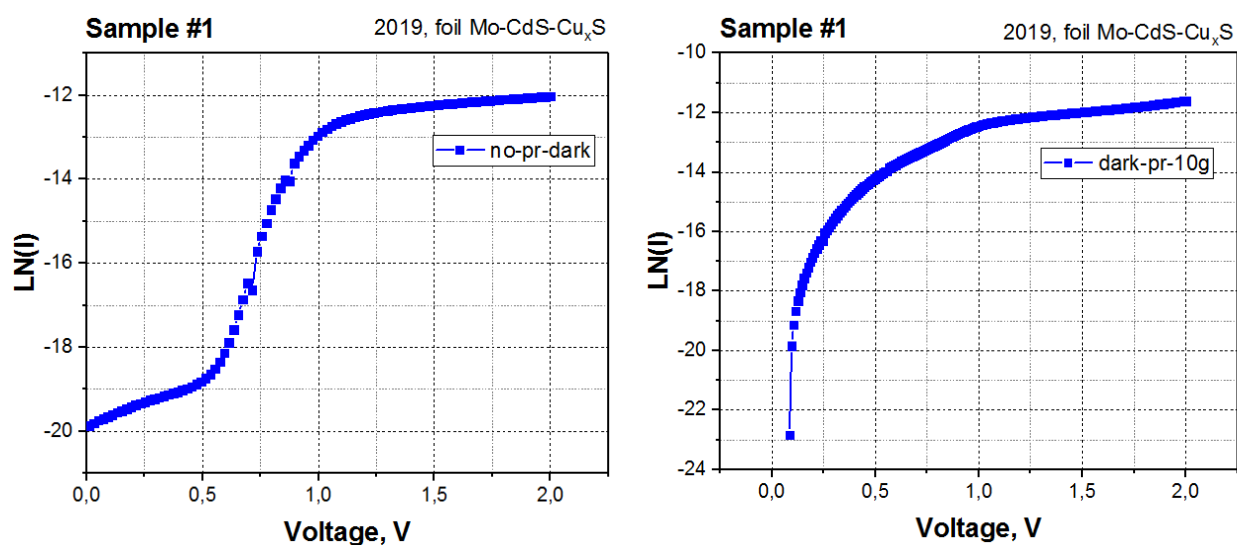


Рис. 2.32. ВАХ для зразку №8 в світловому режимі.

Із отриманих вольт-амперних характеристик (рис. 2.6-2.32) були побудовані графіки залежностей логарифму струму від напруги для визначення коефіцієнту неідеальності n .

Рис. 2.33-2.38. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №1.



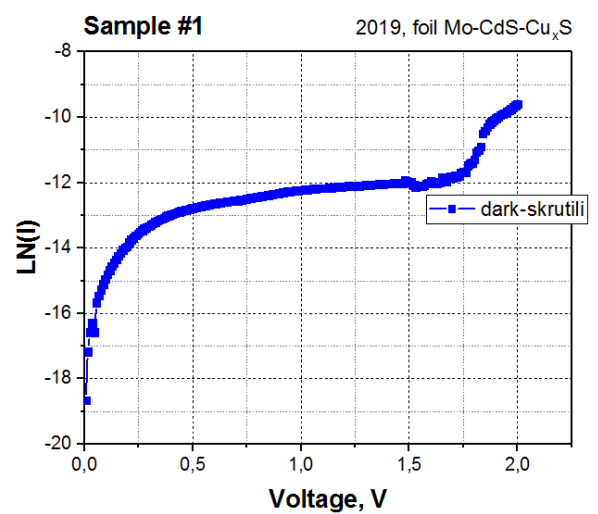
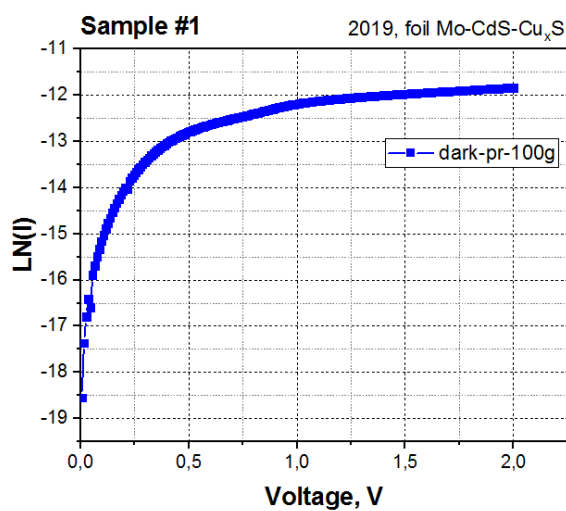
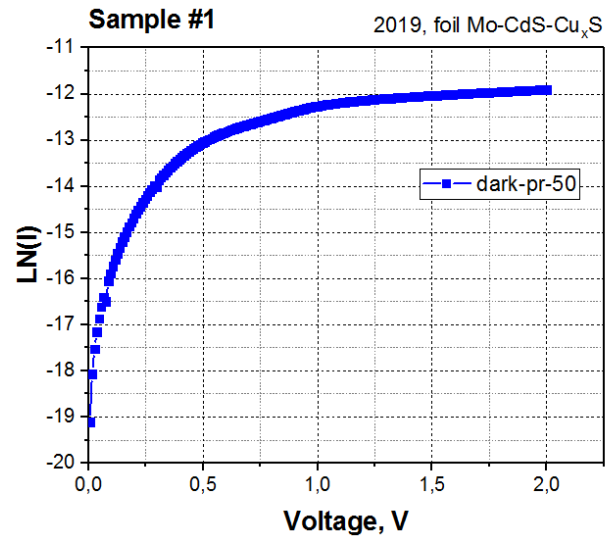
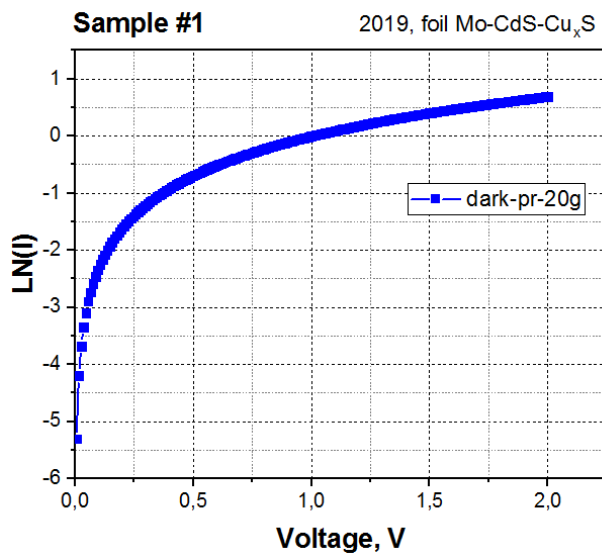
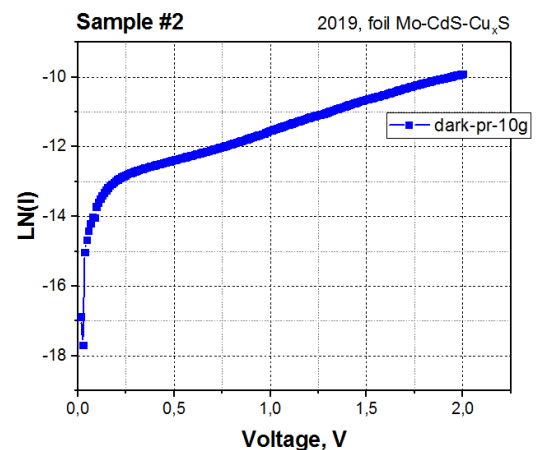
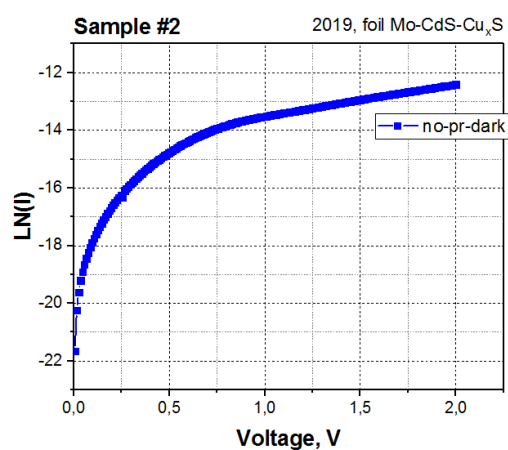


Рис. 2.39-2.44. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №2.



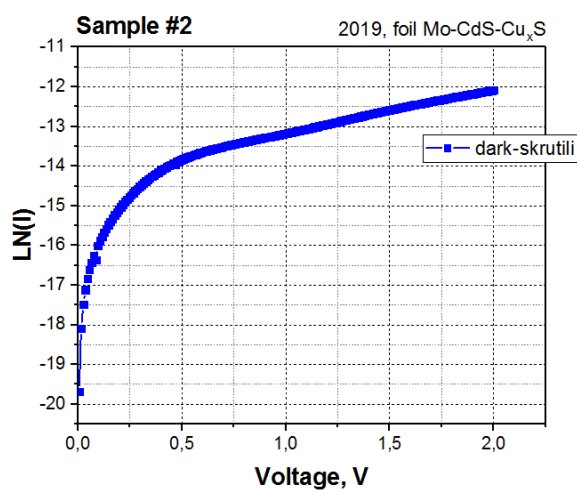
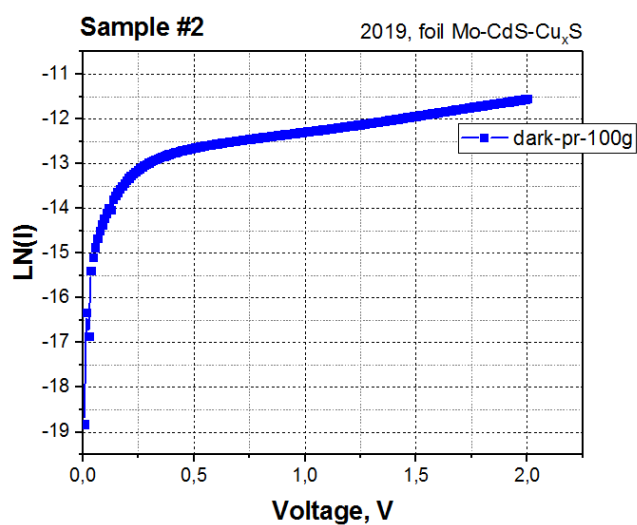
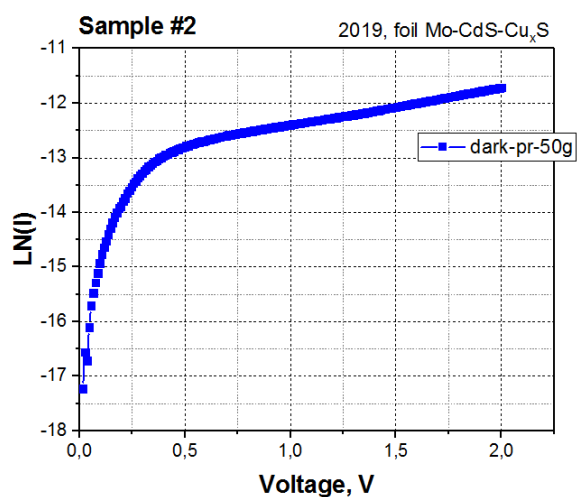
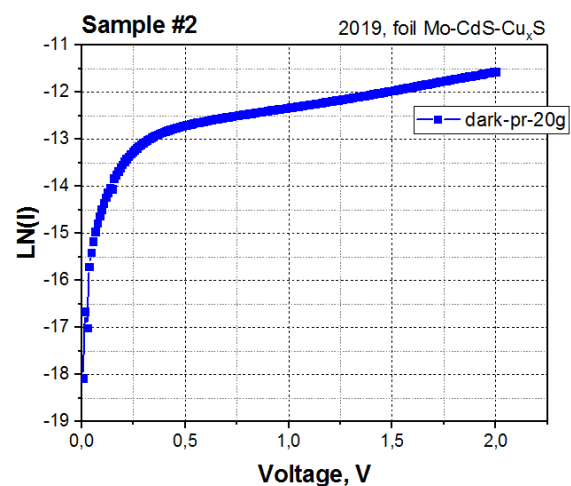
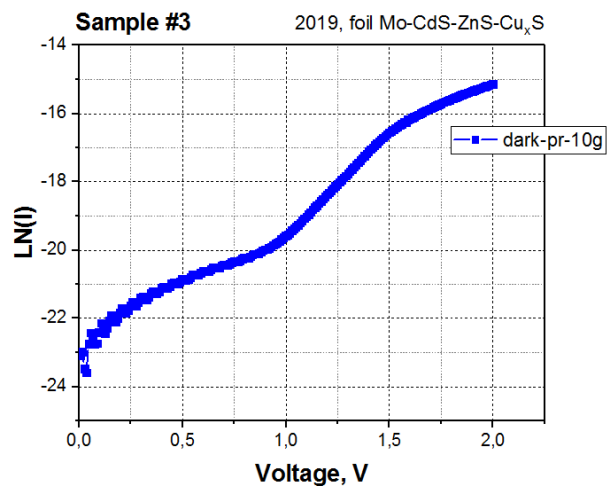
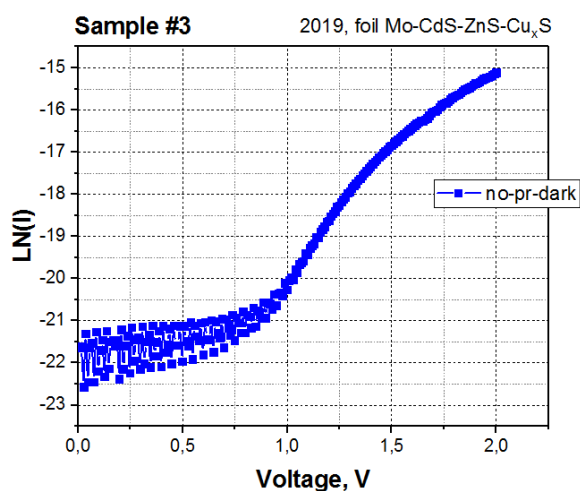


Рис. 2.45-2.50. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №3.



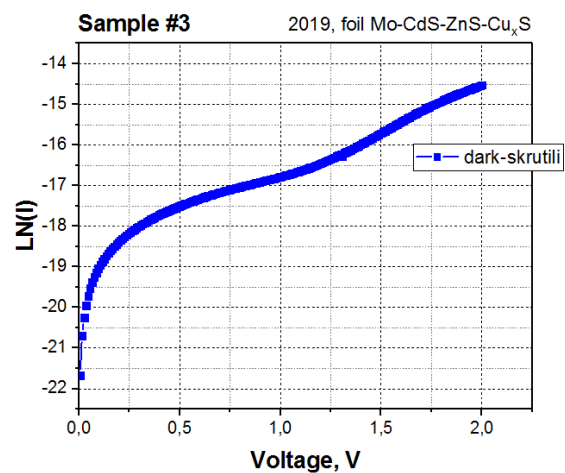
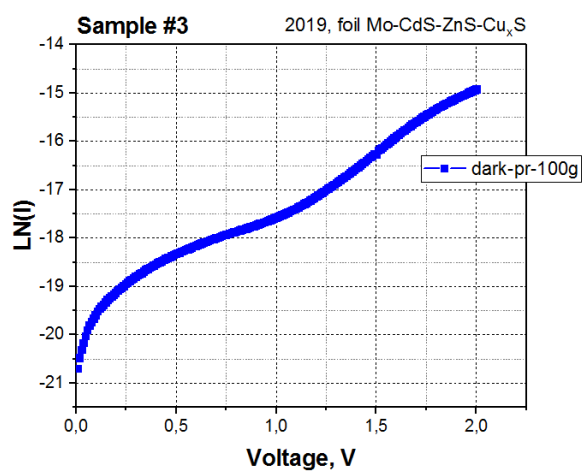
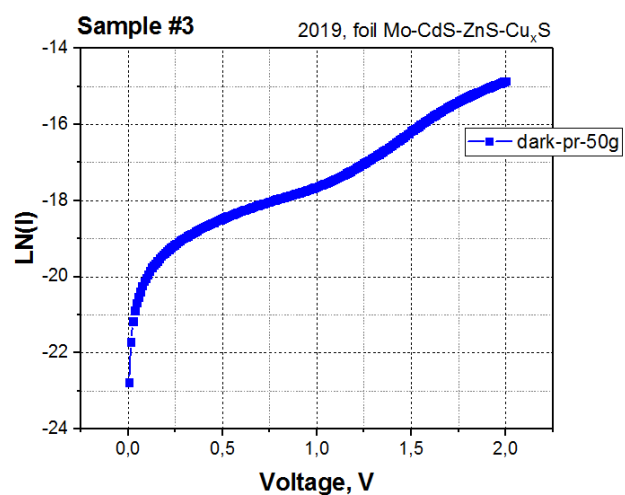
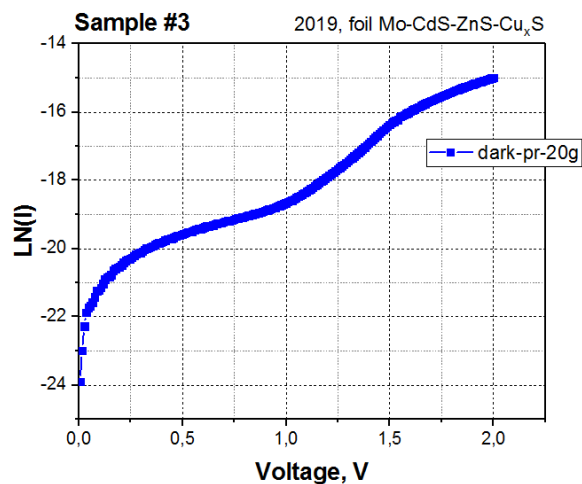
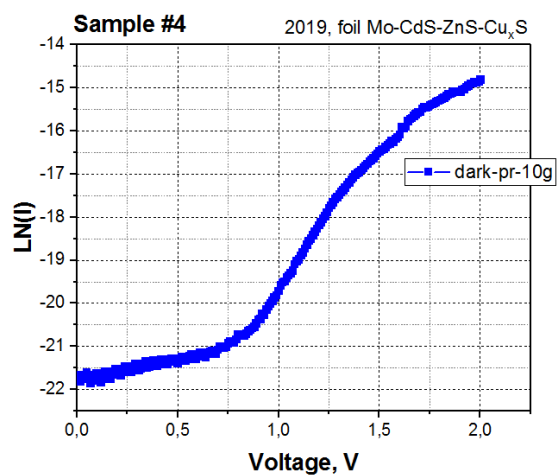
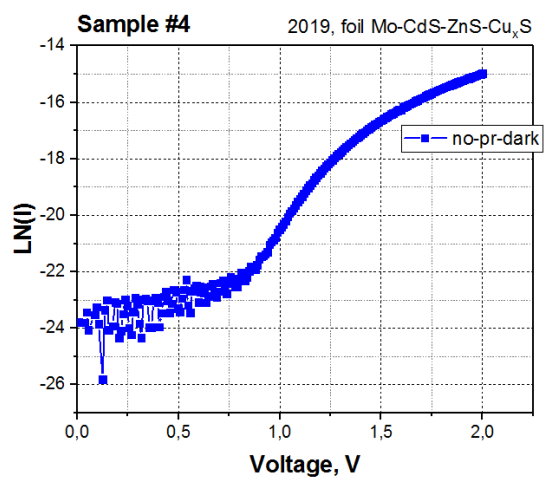


Рис. 2.51-2.56. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №4.



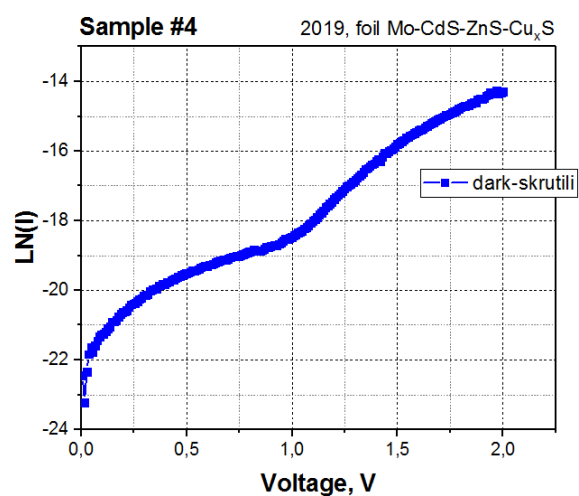
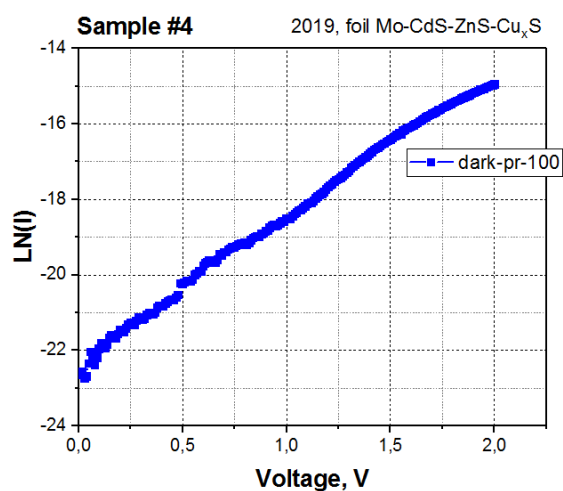
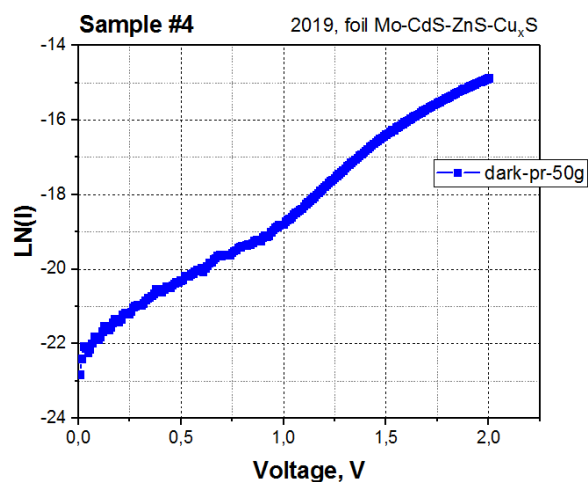
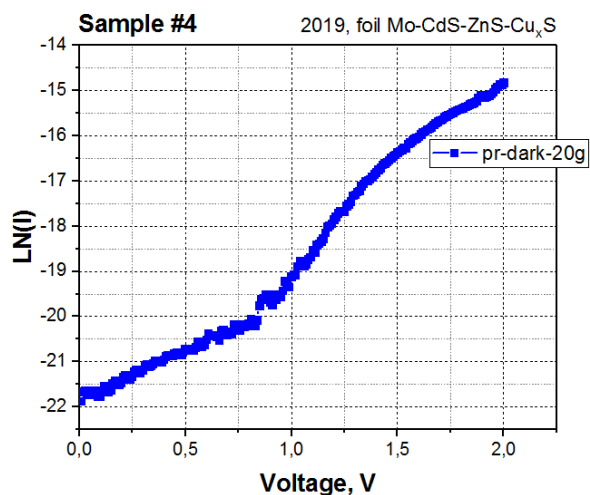
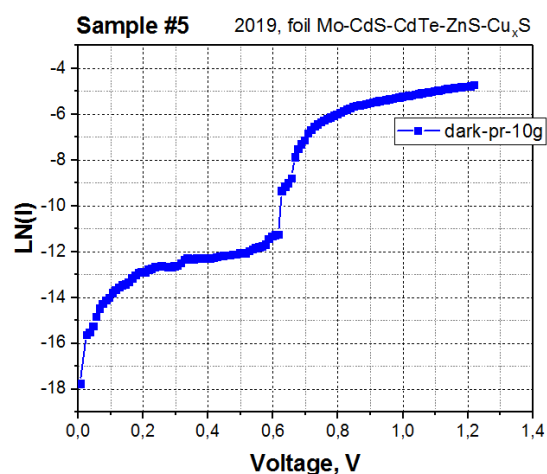
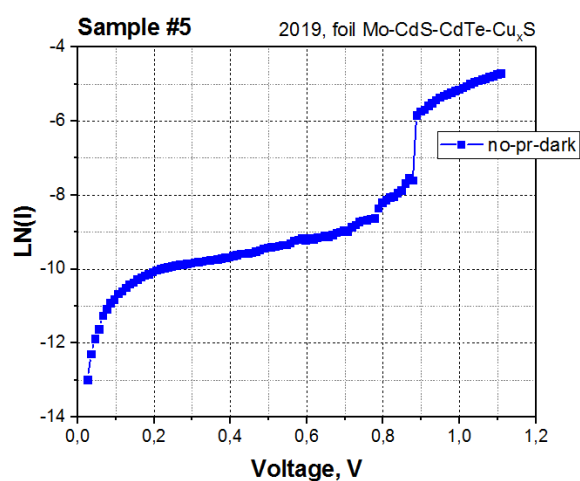


Рис. 2.57-2.62. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №5.



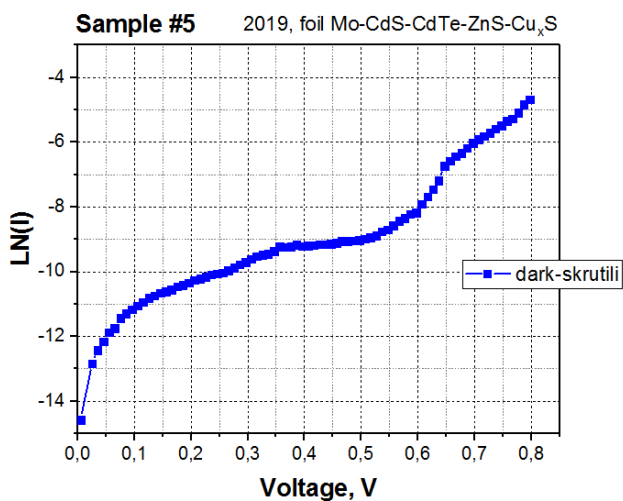
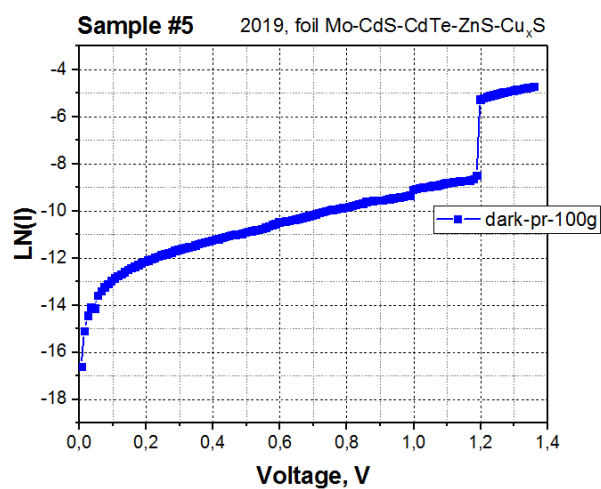
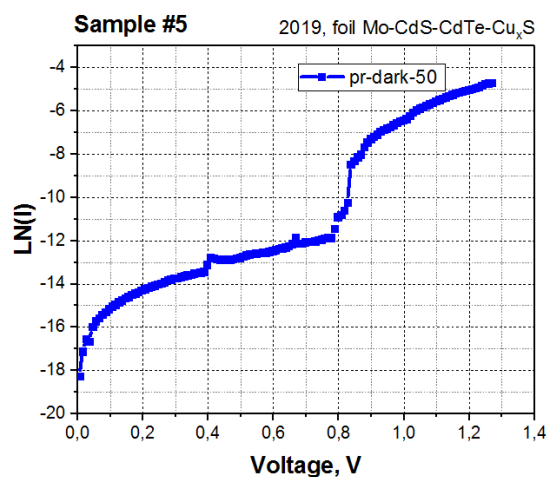
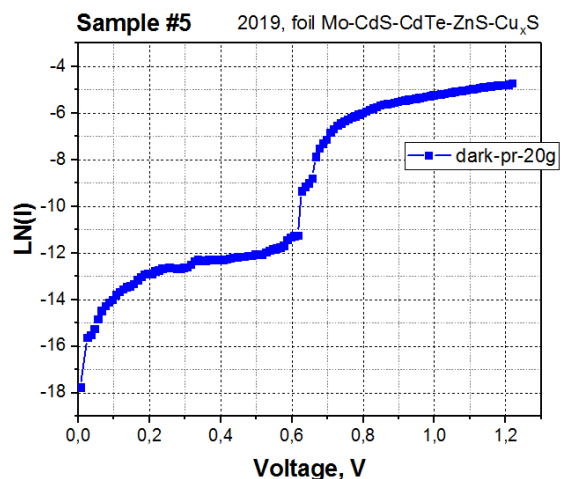
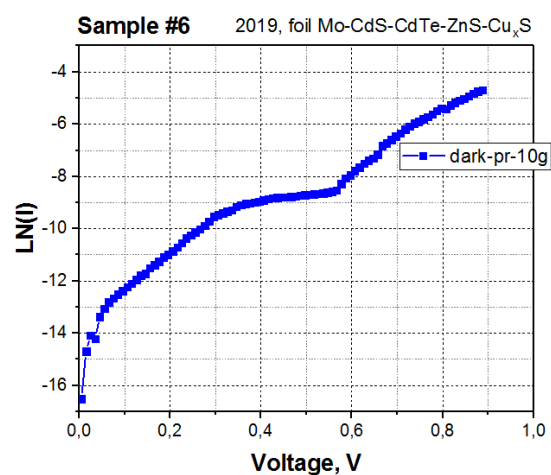
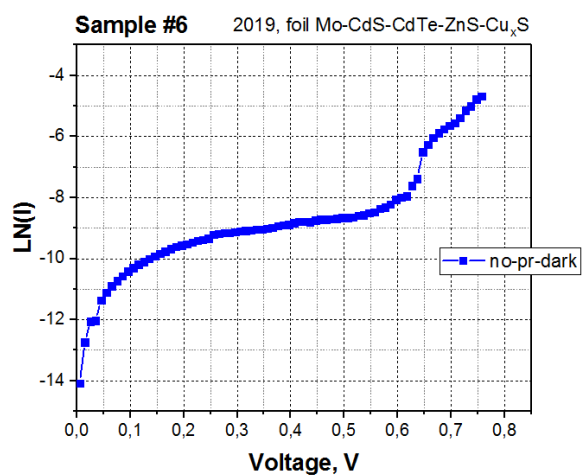


Рис. 2.63-2.68. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №6.



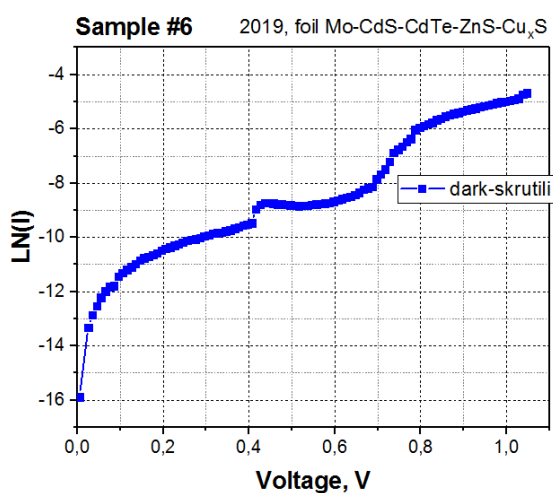
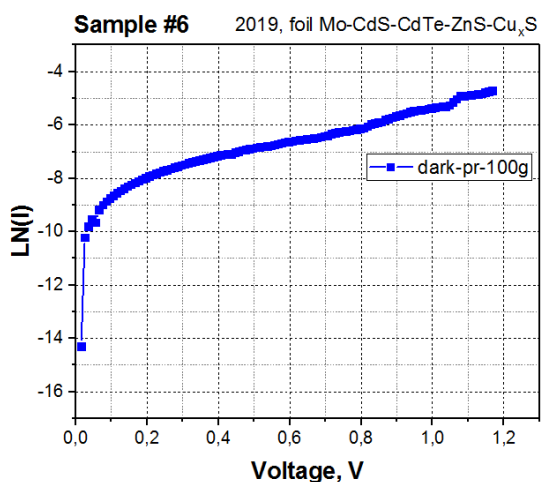
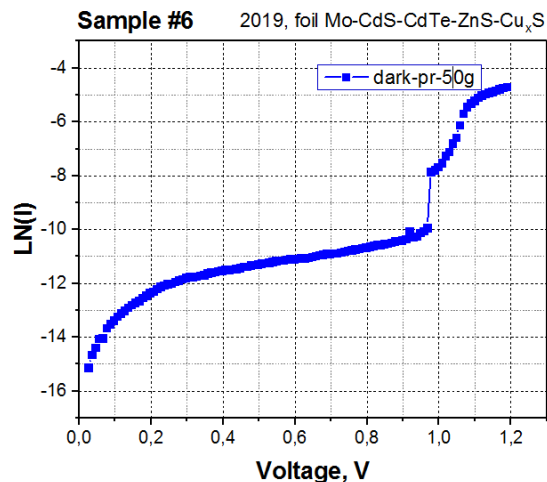
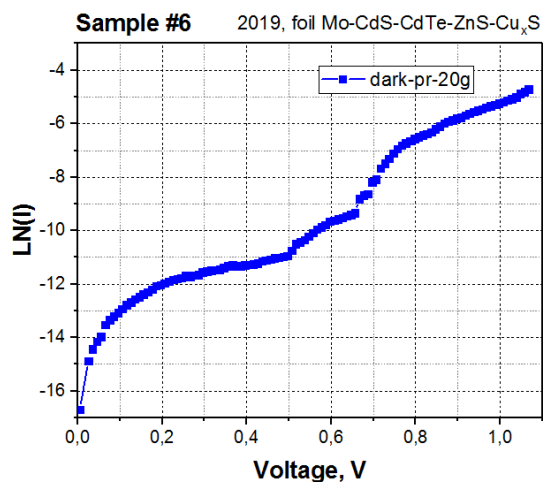
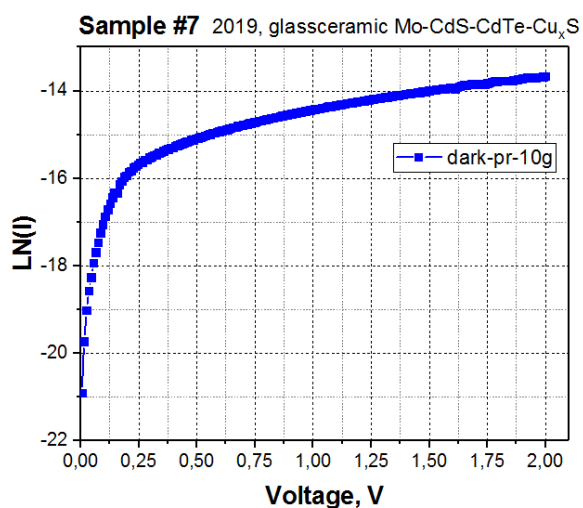
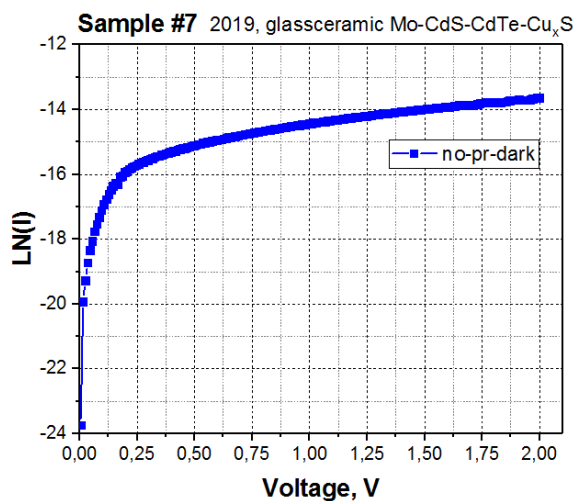


Рис. 2.69-2.72. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №7.



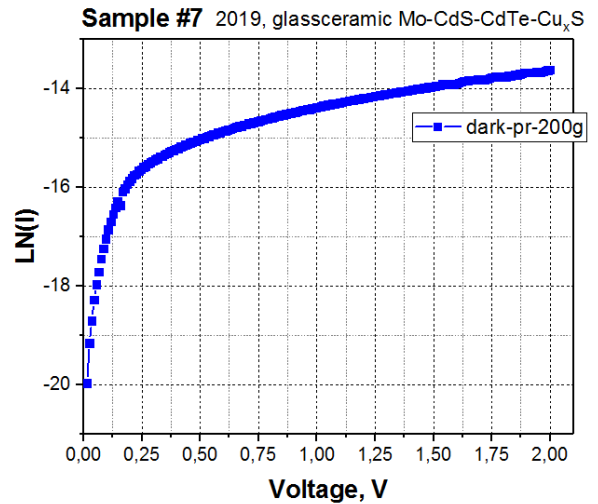
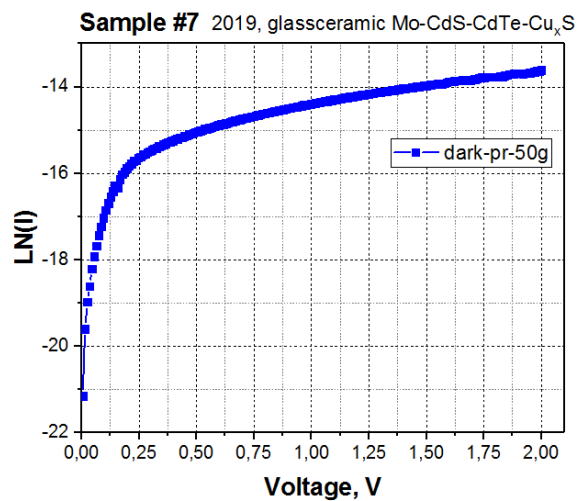
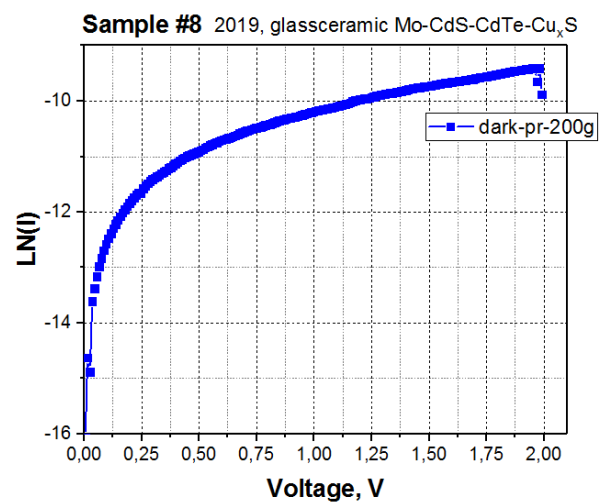
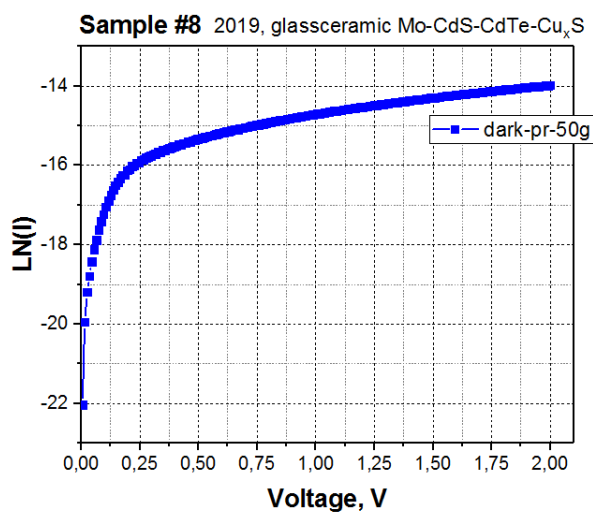
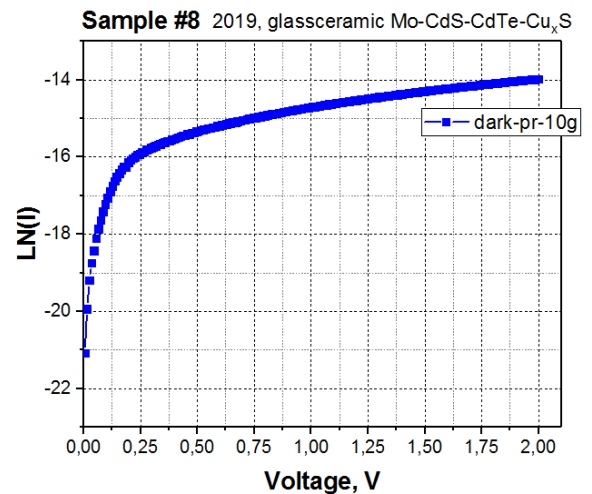
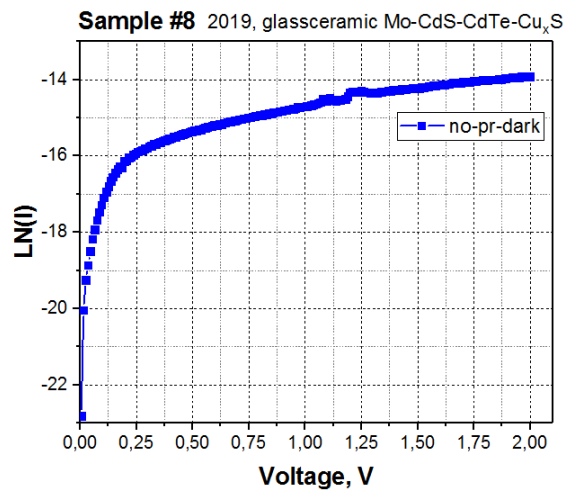


Рис. 2.73-2.76. Залежності логарифму струму від напруги для зразку №8.



Висновки

Таким чином було досліджено гетероструктури чотирьох груп:

- зразки на гнучкій молибденовій фользі (рис. 2.6-2.10), а саме плівки CdS товщиною 3 мкм, на які осаджено шар виродженого напівпровіднику р-типу Cu_xS товщиною 60 нм.
- зразки на молибденовій фользі (рис. 2.11-2.15), CdS товщиною 3 мкм, на які було нанесено плівки ZnS товщиною 200 нм та верхній контакт Cu_xS .
- класична структура сонячного елемента CdS-CdTe (рис. 2.16-2.26), осаджена на молибденову фольгу і зверху нанесено Cu_xS .
- класична структура сонячного елемента CdS-CdTe (рис. 2.27-2.32), осаджена на ситалеву підкладку, на яку було нанесено молибденову плівку в якості нижнього струмоз'ємного контакту, верхній контакт – Cu_xS .

Виміри першої групи зразків – foil Mo-CdS- Cu_xS – показали, що зворотній фотострум збільшується при прикладанні тиску. Найменше збільшення струму було для випадку скрученого зразку, крім того збільшення струму спостерігається і на прямій гілці ВАХ. Цей результат збігається із нашим передбаченням, що напівпровідникові гексагональні фоточутливі плівки CdS мають п'єзофототронний ефект.

Позитивний результат по збільшенні фотоструму при прикладанні тиску було також отримано для другої групи зразків – foil Mo-CdS-ZnS- Cu_xS .

Третя група зразків – foil Mo-CdS-CdTe- Cu_xS – також мала невеликий п'єзофототронний ефект на зворотній гілці ВАХ. Невелика величина п'єзофототронного ефекту пояснюється тим, що товщина плівки CdS в цій структурі була мала, а саме 200 нм. Як відомо кристалічна структура плівок CdTe, товщина якої в нашому випадку складала 1мкм, може бути як

кубічною так і гексагональною. Кубічна структура є центросиметричною і тому не має п'єзоефекту. Скоріш за все п'єзофототронний ефект, що спостерігається, обумовлений тільки шаром CdS. Тому ми не можемо говорити про перспективи підвищенні ККД сонячних елементів на основі структури CdS-CdTe.

При дослідженні зразків 4-тої групи – glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu_xS – ми побачили (рисунок 4), що зразки дійсно працюють як сонячні елементи завдяки наявності фотовентильного ефекту.

В результаті даних досліджень показано, що прямі ВАХ мають істотне відхилення, що говорить про наявність п'єзоелектричного і п'єзофототронного ефектів розглянутих гетероструктур, тому їх доречно використовувати в конструкціях п'єзодатчиків, в п'єзофототронних пристроях та п'єзоелектриці.

3. Інженерно-розрахункова частина

На рис. 3.1 приведена зонна діаграма двох ізольованих напівпровідників. Припускається, що останні відрізняються шириною забороненої зони, діелектричними проникностями ϵ , роботою виходу ϕ_m , і спорідненістю до електрону χ . Робота виходу і спорідненість до електрону визначаються як енергія, необхідна для видалення електрона з рівня Фермі E_F із дна зони провідності E_C в вакуум відповідно. Різниця в положенні дна зони провідності напівпровідників позначено ΔE_C , а відмінність в положенні стелі валентної зони ΔE_V . На рис. 3.1а показаний випадок, коли $\Delta E_C = (\chi_1 - \chi_2)$. Співвідношення $\Delta E_C = \Delta\chi$ може виявитися невиконаним. Однак якщо розглядати ΔE_C як емпіричну величину, то модель Андерсона не потребує змін [28]. Зонна діаграма анізотипного p-n-гетеропереходу в рівновазі, утвореного такими напівпровідниками, наведена на рис. 3.1б.

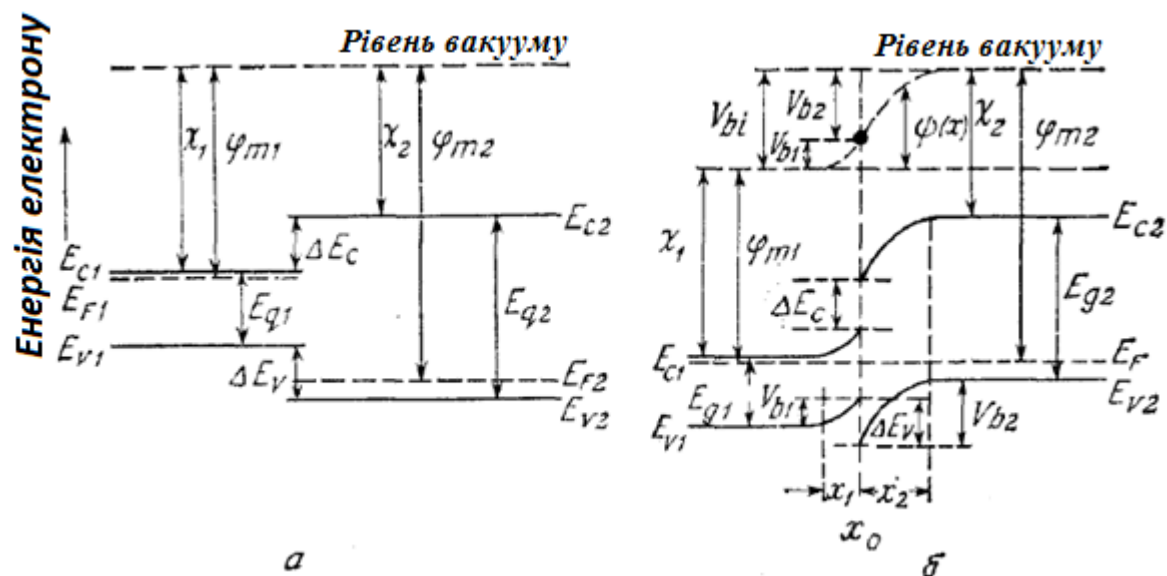


Рис. 3.1. Зонні діаграми двох ізольованих напівпровідників за умови електронейтральності (а) та ідеального анізотипного р-п-гетеропереходу при тепловій рівновазі (б) [28].

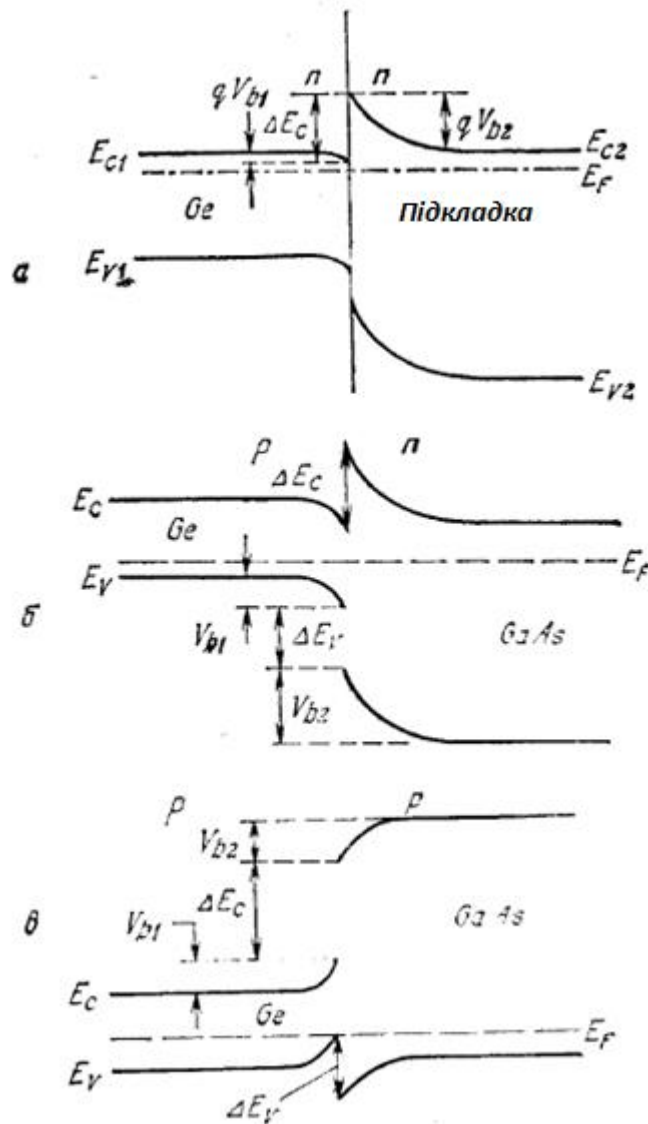


Рис. 3.2. Зонні діаграми ідеального ізотипного n-n-гетеропереходу (а), а також ідеальних р-n- (б) і р-р-гетеропереходів (в) [28].

Формула вольт-амперної характеристики на основі гетеропереходу:

$$J = J_0 \left(1 - \frac{U}{U_{bi}} \right) \left[\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right],$$

однак, так як параметр U_{bi} – повний контактний потенціал, що рівний сумі електростатичних потенціалів рівноважного стану першого та другого напівпровідників відповідно U_{b1} та U_{b2} – невідомий, тому в своїх розрахунках ми будемо використовувати формулу для розрахунку ідеального р-n-переходу, а не гетеропереходу.

Розрахунок коефіцієнту неідеальності n:

$$I = I_0(e^{\frac{qU}{n k T}} - 1)$$

звідси

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\partial U}{\partial \ln(I)} = \frac{q}{kT} \frac{(U_2 - U_1)}{\{\ln(I_2) - \ln(I_1)\}}$$

Розрахунок коефіцієнту К за формулою:

$$K = \frac{R_R}{R_F},$$

де R_R – це опір зворотної вітки зразку, а R_F – опір прямої вітки зразку

Розрахунок параметру $\Delta\Phi$ – зміна висоти бар'єру, за формулою:

$$\Delta\Phi = -kT \ln(I_S/I_0),$$

де I_S та I_0 струми при фіксованому значенні напруги без тиску та під тиском відповідно.

Розрахунок параметру – “відгук по зміні опору” за формулою:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{(R_S - R_0)}{R_0},$$

де R_S і R_0 – диференціальні опори під тиском та без тиску відповідно.

Розрахунок параметру S – чутливість зразку за формулою:

$$S = \frac{I_{\text{світло}} - I_{\text{темно}}}{I_{\text{темно}}} \cdot 100\%,$$

де $I_{\text{світло}}$ та $I_{\text{темно}}$ – струми при фіксованому значенні напруги при включеній та виключеній лампочці.

Отримані числові значення параметрів були занесені до таблиць.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зразок №1 – foil Mo-CdS-Cu_xS

	1	2	3	4	5	6
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 20 г	Тиск 50 г	Тиск 100 г	Деформація скручування
Фактор неідеальності n	2.291	11,8 / 59,8	31,5 / 123,5	27,5 / 120,2	34,9 / 124,5	2.16 / 8,75
R _{посл.} , Ohm	41483.6	59047.7	21250.3	19463.8	23217.9	10506.8
R _{шунт.} , Ohm	13843.1	29014.3	23347.5	14249.9	14293.5	6994.6
Open circuit Potential U _{OC} , V	0.2004	0.0743	0.1238	0.1361	0.1425	0.0964
Short circuit Current I _{sc} , mA/cm ²	0.008	0.004	0.006	0.008	0.008	0.014
Fill factor, %	38.66	35.97	24.67	30.1	30.51	24.49
Max Efficiency, %	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Max Power, mW/cm ²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Potential of Max Efficiency U, V	0.1053	0.0651	0.0551	0.0751	0.0751	0.0551
Surface Area, cm ²	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95

Sun Power, mW/cm ²	3	3	3	3	3	3
-------------------------------	---	---	---	---	---	---

Табл. 3.2.

Зразок №2 – foil Mo-CdS-Cu_xS

	1	2	3	4	5	6
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 20 г	Тиск 50 г	Тиск 100 г	Деформація скручування
Фактор неідеальності n	34,8	25,6	55,4	57,3	58,8	37
R _{посл.} , Ohm	37315.1	-16513.2	-72806.6	17015.1	10228.2	46328.5
R _{шунт.} , Ohm	10034.8	6335.4	6684.3	7017.9	6355.7	9315.4
Open circuit Potential U _{OC} , V	0.0436	0.0888	0.0763	0.0876	0.0891	0.5821
Short circuit Current I _{SC} , mA/cm ²	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.013
Fill factor, %	127.41	78333.41	11406.13	91113.03	32.33	8.84
Max Efficiency, %	0.01	18.06	2.30	21.04	0.01	0.02
Max Power, mW/cm ²	0.00	0.54	0.07	0.63	0.00	0.00
Potential of Max Efficiency U, V	0.0751	-1.2080	-1.2080	-1.2782	0.0451	0.1253
Surface Area, cm ²	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sun Power, mW/cm ²	3	3	3	3	3	3

Зразок №3 – foil Mo-CdS-ZnS-Cu_xS

	1	2	3	4	5	6
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 20 г	Тиск 50 г	Тиск 100 г	Деформація скручування
Фактор неідеальності η	5,6	6.3	8 / 16	12 / 18	12,2	14,7
$R_{\text{посл.}}, \text{ Ohm}$	1805796.0	1280491.1	335180936.3	-207439196.4	724098.8	686104.4
$R_{\text{шунт.}}, \text{ Ohm}$	1607065.2	930995.9	538231.0	493826.9	453346.5	489869.3
Open circuit Potential $U_{\text{oc}}, \text{ V}$	0.3141	0.1691	0.0951	0.0854	0.0803	0.0586
Short circuit Current $I_{\text{sc}}, \text{ mA/cm}^2$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fill factor, %	25.97	24.42	21.91	22.81	24.06	27.04
Max Efficiency, %	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max Power, mW/cm^2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Potential of Max Efficiency $U, \text{ V}$	0.1253	0.0851	0.0451	0.0351	0.0351	0.0251
Surface Area, cm^2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sun Power, mW/cm^2	3	3	3	3	3	3

Зразок №4 – foil Mo-CdS-ZnS-Cu_xS

	1	2	3	4	5	6
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 20 г	Тиск 50 г	Тиск 100 г	Деформація скручування
Фактор неідеальності n	3,9	5,2	6,7	8,2	8,7	6,9
$R_{\text{посл.}}$, Ohm	6357547.8	3620415.1	2992535.2	3586032.8	2852138.1	3262690.9
$R_{\text{шунт.}}$, Ohm	2837373.0	2144348.7	2362284.8	1878282.6	1994892.7	2334511.5
Open circuit Potential U_{OC} , V	0.6519	0.5081	0.4431	0.4517	0.4237	0.4546
Short circuit Current I_{sc} , mA/cm ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fill factor, %	22.10	28.78	26.02	23.88	27.41	21.95
Max Efficiency, %	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max Power, mW/cm ²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Potential of Max Efficiency U , V	0.2556	0.1855	0.1554	0.2156	0.1454	0.1554
Surface Area, cm ²	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sun Power, mW/cm ²	3	3	3	3	3	3

Зразок №5 – foil Mo-CdS-CdTe-Cu_xS

	1	2	3	4	5	6
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 20 г	Тиск 50 г	Тиск 100 г	Деформація скручування
Фактор неідеальності n	4,8 / 9	5,5 / 6,2	5,3 / 14,7	13,2 / 4,4	15,3 / 12,3	3,5
$R_{\text{посл.}}, \text{ Ohm}$	14903.0	11203.8	14595.2	7181.3	4452.2	6955.9
$R_{\text{шунт.}}, \text{ Ohm}$	1498.5	3615.6	2833.0	4887.3	9133.4	1255.2
Open circuit Potential $U_{\text{OC}}, \text{ V}$	0.2480	0.3014	0.3338	0.2702	0.3002	0.1841
Short circuit Current $I_{\text{SC}}, \text{ mA/cm}^2$	0.061	0.059	0.060	0.060	0.060	0.060
Fill factor, %	48.73	39.97	37.02	42.70	37.16	48.20
Max Efficiency, %	0.24	0.24	0.25	0.23	0.22	0.18
Max Power, mW/cm^2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Potential of Max Efficiency $U, \text{ V}$	0.1453	0.1453	0.1453	0.1353	0.1253	0.1253
Surface Area, cm^2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sun Power, mW/cm^2	3	3	3	3	3	3

Зразок №6 – foil Mo-CdS-CdTe-Cu_xS

	1	2	3	4	5	6
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 20 г	Тиск 50 г	Тиск 100 г	Деформація скручування
Фактор неідеальності n	4,08	2,06	3,6 / 6,8	4,6 / 6,7	10,8	10,4
$R_{\text{посл.}}, \text{ Ohm}$	5938.3	1269.2	3352.1	4417.8	1790761.4	4802.7
$R_{\text{шунт.}}, \text{ Ohm}$	1278.4	35319.9	43990.3	47292.5	551.6	2186.2
Open circuit Potential $U_{\text{OC}}, \text{ V}$	0.1754	0.2105	0.2512	0.2911	0.0432	0.2819
Short circuit Current $I_{\text{SC}}, \text{ mA/cm}^2$	0.130	0.059	0.059	0.059	0.062	0.060
Fill factor, %	22.40	44.11	37.05	33.09	33.81	37.37
Max Efficiency, %	0.17	0.18	0.18	0.19	0.03	0.21
Max Power, mW/cm^2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Potential of Max Efficiency $U, \text{ V}$	0.1153	0.1153	0.1153	0.1253	0.0251	0.1253
Surface Area, cm^2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sun Power, mW/cm^2	3	3	3	3	3	3

Зразок №7 – glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu_xS

	1	2	3	4
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 50 г	Тиск 200 г
Фактор неідеальності n	51	51,1	51,7	48,6
R _{посл.} , Ohm	24508.9	36925.9	22406.9	37291.4
R _{шунт.} , Ohm	134119.6	91525.0	78265.2	134495.8
Open circuit Potential U _{OC} , V	0.3847	0.3923	0.3704	0.3917
Short circuit Current I _{SC} , mA/cm ²	0.077	0.076	0.075	0.076
Fill factor, %	46.13	36.21	37.44	36.15
Max Efficiency, %	0.46	0.36	0.35	0.36
Max Power, mW/cm ²	0.01	0.01	0.01	0.01
Potential of Max Efficiency U, V	0.1955	0.1655	0.1555	0.1555
Surface Area, cm ²	0.75	0.75	0.75	0.75
Sun Power, mW/cm ²	3	3	3	3

Зразок №8 – glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu_xS

	1	2	3	4
Виміри	Без тиску	Тиск 10 г	Тиск 50 г	Тиск 200 г
Фактор неідеальності n	56,2	55,3	55,3	59,8
$R_{\text{посл.}}, \text{ Ohm}$	22593.2	29380.1	41536.4	7385.3
$R_{\text{шунт.}}, \text{ Ohm}$	142173.1	93821.7	101109.9	73835.7
Open circuit Potential $U_{\text{OC}}, \text{ V}$	0.3916	0.3835	0.3821	0.2509
Short circuit Current $I_{\text{SC}}, \text{ mA/cm}^2$	0.077	0.075	0.075	0.075
Fill factor, %	43.79	32.16	31.89	45.84
Max Efficiency, %	0.44	0.31	0.30	0.29
Max Power, mW/cm^2	0.01	0.01	0.01	0.01
Potential of Max Efficiency $U, \text{ V}$	0.1955	0.1453	0.1453	0.1353
Surface Area, cm^2	0.75	0.75	0.75	0.75
Sun Power, mW/cm^2	3	3	3	3

Табл. 3.9.

Коефіцієнт нелінійності.

№	Матеріал	Коефіцієнт нелінійності, η												
		Без тиску		10г		20г		50г		100г		200г	Деформація скручування	
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	2.29 1	-	11.8	59. 8	31. 5	123. 5	27. 5	120. 8	34. 8	124. 5	-	2.1 6	8.7 5
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	34.8	-	25.6 1	-	55. 4	-	57. 3	-	58. 8	-	-	37	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	5.6	-	6.3	-	8	16	12	18	12. 2	-	-	14. 7	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	3.9	-	5.2	-	6.7	-	8.2	-	8.7	-	-	6.9	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	4.8	9	5.5	6.2	5.3	14.7	13. 2	4.4	15. 3	12.3	-	3.5	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	4.08	-	2.6	-	3.6	6.8	4.6	6.7	10. 8	-	-	10. 4	-
7	Glasscerami с Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	51	-	51.1	-	-	-	51. 7	-	-	-	48.6	-	-
8	Glasscerami с Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	56.2	-	55.3	-	-	-	55. 3	-	-	-	59.8	-	-

Табл. 3.10.

Розрахований коефіцієнт нелінійності.

№	Матеріал	Коефіцієнт нелінійності, η												
		Без тиску		10г		20г		50г		100г		200г	Деформація скручування	
		Д1	Д2	Д1	Д2	Д1	Д2	Д1	Д2	Д1	Д2		Д1	Д2
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	2,28	-	11,78	54,7	21,09	52,33	27,37	125,87	34,39	128,49	-	2,97	9,82
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	34,03	-	22,73	-	52,8	-	57,93	-	55,43	-	-	34,38	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	5,61	-	6,20	-	8,99	16,27	13,5	17,1	13,43	-	-	14,04	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	3,63	-	5	-	6,33	-	7,47	-	8,68	-	-	6,46	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	4,05	8,4	4,71	5,98	5,13	14,3	13,4	4,76	15,19	11,89	-	3,37	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	4,52	-	2,81	-	3,43	7,06	4,55	6,52	10,49	-	-	11,26	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	51,41	-	50,98	-	-	-	52,38	-	-	-	45,69	-	-
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	53,87	-	55,2	-	-	-	56,46	-	-	-	61,24	-	-

Табл. 3.11.

Прямий опір в режимі вимкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Прямий опір, R_F					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	5,0731*10 ⁵	3,0672*10 ₅	2,198*10 ⁵	2,198*10 ⁵	1,873*10 ⁵	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	8,781*10 ⁵	-	1,431*10 ⁵	1,7995*10 ⁵	1,258*10 ⁵	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	2,445*10 ⁷	2,529*10 ⁷	2,204*10 ⁷	1,506*10 ⁷	1,506*10 ⁷	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	1,7273*10 ⁷	2,1061*10 ₇	1,5437*10 ⁷	1,7639*10 ⁷	1,803*10 ⁷	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	195.367	357.167	342.087	281.459	-	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	289.867	358.35	902.346	480.764	-	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	1,76*10 ⁶	1,785*10 ⁶	-	1,727*10 ⁶	-	1,65*10 ⁶
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	2,094*10 ⁶	2,053*10 ⁶	-	1,982*10 ⁶	-	-

Табл. 3.12.

Прямий опір в режимі увімкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Прямий опір, R_F					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	12933	12385	11779	11049	11050	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	10491	5427	6555	6555	6555	-

3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	833.3*10 ³	684.2*10 ³	463.4*10 ³	444.6*10 ³	458.6*10 ³	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	1201.5*10 ³	1102*10 ³	1071.7*10 ³	1094*10 ³	1086.3*10 ³	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	178.198	176.054	178.872	186.929	209.540	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	186.254	418.177	191.518	346.072	-	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	236582	314947	-	314947	-	314947
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	248500	315700	-	315700	-	-

Табл. 3.13.

Прямий опір в режимі вимкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Прямий опір, r_F					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	9,285*10 ⁴	4,316*10 ⁴	2.044*10 ⁵	2.044*10 ⁵	1.475*10 ⁵	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	4,959*10 ⁵	-	1,259*10 ⁵	1,304*10 ⁵	1,169*10 ⁵	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	3,594*10 ⁶	3,438*10 ⁶	2,914*10 ⁶	2,779*10 ⁶	2,779*10 ⁶	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	2,637*10 ⁶	3,14*10 ⁶	2,6*10 ⁶	3,377*10 ⁶	3,234*10 ⁶	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	38.0345	66.8	58.458	37.1	-	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	23.857	41.059	82.912	10.003	-	-

7	Glassceramic Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	2,03*10 ⁶	2,013*10 ⁶	-	1,918*10 ⁶	-	1,878*10 ⁶
8	Glassceramic Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	2,408*10 ⁶	2,209*10 ⁶	-	2,295*10 ⁶	-	-

Табл. 3.14.

Прямий опір в режимі увімкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Прямий опір, r_F					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	4632	4414	4750	4973	5093	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	4060	2453	2463	2463	2463	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS- Cu _x S	191.96*10 ³	186.3*10 ³	173.7*10 ³	160.6*10 ³	185.7*10 ³	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS- Cu _x S	177.8*10 ³	186.6*10 ³	211.7*10 ³	213.1*10 ³	208.7*10 ³	-
5	Foil Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	16.876	14.461	28.581	57.188	42.636	-
6	Foil Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	23.2689	63.528	32.068	34.082	-	-
7	Glassceramic Mo- CdS-CdTe-Cu _x S	220689	299085	-	299085	-	299085
8	Glassceramic Mo- CdS-CdTe-Cu _x S	236900	330850	-	330850	-	-

Табл. 3.15.

Зворотній опір в режимі вимкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Зворотній опір, R_R					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	259.25*10 ⁶	22.035*10 ⁶	2.845*10 ⁶	2.2684*10 ⁶	9,37*10 ⁵	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	12.73*10 ⁶	-	3,74*10 ⁵	5,54*10 ⁵	2,22*10 ⁵	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	569.57*10 ⁶	1058.56*10 ₆	152.39*10 ₆	38.814*10 ⁶	45.317*10 ₆	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	4.4712*10 ⁹	1.1793*10 ⁹	7,442*10 ⁸	6,127*10 ⁸	5,961*10 ⁸	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	3,955*10 ⁴	1,736*10 ⁵	1,214*10 ⁵	7,01*10 ⁴	-	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	-	-	1,907*10 ⁵	2,631*10 ⁵	-	-
7	Glasscerami c Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	1,236*10 ⁷	1,385*10 ⁷	-	1,3*10 ⁷	-	1,184*10 ⁷
8	Glasscerami c Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	2,006*10 ⁷	2,04*10 ⁷	-	1,974*10 ⁷	-	-

Табл. 3.16.

Зворотній опір в режимі увімкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Зворотній опір, R_R					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	8248	17050	12970	9370	9954	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	6238	4051.5	4051.5	4051.5	4051.5	-

3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	898.4*10 ³	424.04*10 ³	233.6*10 ³	172.24*10 ³	150.17*10 ³	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	934.7*10 ³	846.5*10 ³	316.8*10 ³	316.8*10 ³	316.8*10 ³	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	3068	3058	3220.8	2374	2374	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	2258.2	11272.9	3845.3	3684.9	-	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	12827.9	11661.4	-	11661.4	-	11661.4
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	10650	10680	-	10680	-	-

Табл. 3.17.

Зворотній опір в режимі вимкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Зворотній опір, r_R					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	14.52*10 ⁷	4.192*10 ⁷	3,877*10 ⁶	3,01*10 ⁶	1,312*10 ⁶	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	12.658*10 ⁶	-	4,678*10 ⁵	7,652*10 ⁵	2,927*10 ⁵	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	23.644*10 ⁸	9.325*10 ⁸	2.78*10 ⁸	3,61*10 ⁷	2,79*10 ⁷	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	1.9803*10 ⁹	3,334*10 ⁸	3,647*10 ⁸	4,418*10 ⁸	5,778*10 ⁸	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	1,67*10 ⁵	1,621*10 ⁸	8,43*10 ⁴	2,98*10 ⁴	-	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	-	-	1,108*10 ⁵	1,779*10 ⁵	-	-

7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe- Cu _x S	1,877*10 ⁷	1,868*10 ⁷	-	1,848*10 ⁷	-	1,832* 10 ⁷
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe- Cu _x S	1,917*10 ⁷	2,259*10 ⁷	-	2,24*10 ⁷	-	-

Табл. 3.18.

Зворотній опір в режимі увімкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Зворотній опір, r_R					
		Без тиску	10Г	20Г	50Г	100Г	200Г
1	Foil Mo-CdS- Cu _x S	15780	14780	17030	13475	14944	-
2	Foil Mo-CdS- Cu _x S	10190	5264.2	5264.2	5264.2	5264.2	-
3	Foil Mo-CdS- ZnS-Cu _x S	976.88* 10 ³	343.81*10 ³	129.85*10 ³	295.68*10 ³	84.89*10 ³	-
4	Foil Mo-CdS- ZnS-Cu _x S	2056.2* 10 ³	846.5*10 ³	1921*10 ³	1921*10 ³	1921*10 ³	-
5	Foil Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	12286	7067	9898.4	6233	6233	-
6	Foil Mo-CdS- CdTe-Cu _x S	7049.5	319296	12143	10997.3	-	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe- Cu _x S	112100 0	833500	-	833500	-	833500
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe- Cu _x S	802020	846780	-	846780	-	846780

Табл. 3.19.

Коефіцієнт випрямлення діоду в режимі вимкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Коефіцієнт випрямлення діоду, <i>K</i>					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	511.03	71.841	12.944	10.32	5.003	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	14.49	-	2.614	3.079	1.766	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	23.3	36.875	6.915	2.568	3.009	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	258.855	55.995	48.208	34.733	33.059	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	202.439	486.047	354.88	249.06	-	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	-	-	211.338	547.337	-	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	7.021	7.761	-	7.529	-	7.176
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	9.58	9.937	-	9.96	-	-

Табл. 3.20.

Коефіцієнт випрямлення діоду в режимі увімкненого світлодіоду.

№	Матеріал	Коефіцієнт випрямлення діоду, <i>K</i>					
		Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	0.6377	1.3767	1.1011	0.848	0.9008	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	0.5946	0.7465	0.6181	0.6181	0.6181	-

3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	1.0781	0.6198	0.5041	0.3874	0.3275	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	0.7779	0.7681	0.2956	0.2896	0.2916	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	17.2168	17.3697	18.0062	12.7	11.32	-
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	12.124	26.957	20.078	10.648	-	-
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	0.054	0.037	-	0.037	-	0.037
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	0.043	0.034	-	0.034	-	-

Табл. 3.21.

Розрахований коефіцієнт зміни висоти бар'єру $\Delta\Phi$.

№	Матеріал	Коефіцієнт зміни висоти бар'єру, $\Delta\Phi$						
		Режим	10Г	20Г	50Г	100Г	200Г	Деформація скручування
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	dark-forward	-2,14E-21	2,83E-21	-2,90E-21	-3,23E-21	-	2,33E-22
		dark-reverse	-9,53E-21	-1,78E-20	-1,87E-20	-2,19E-20	-	-3,23E-21
		light-forward	-5,07E-22	-1,22E-21	-1,99E-21	-1,87E-21	-	-
		light-reverse	-2,95E-21	-3,05E-21	-3,33E-21	-2,74E-21	-	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	dark-forward	-8,21E-21	-4,94E-21	-4,65E-21	-5,09E-21	-	-1,41E-21
		dark-reverse	-1,74E-20	-1,33E-20	-1,15E-20	-1,53E-20	-	-9,54E-21
		light-forward	-4,21E-21	-4,31E-21	1,23E-20	-	-	1,11E-21
		light-reverse	-	-	-	4,43E-21	-	1,10E-21
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	dark-forward	-2,83E-21	-6,63E-21	-1,09E-20	-1,11E-20	-	-1,44E-20
		dark-reverse	-6,36E-21	-1,39E-20	-2,07E-20	-2,17E-20	-	-2,52E-20

		light-forward	-3,51E-21	-6,13E-21	-6,58E-21	-6,54E-21	-	2,21E-20
		light-reverse	-4,34E-21	-8,18E-21	-9,90E-21	-1,07E-20	-	3,37E-20
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	dark-forward	-7,63E-22	-1,17E-21	-1,09E-21	-1,02E-21	-	-3,49E-21
		dark-reverse	-6,36E-21	-8,12E-21	-5,70E-21	-6,15E-21	-	-9,73E-21
		light-forward	-1,08E-21	-1,41E-21	-1,61E-21	-1,96E-21	-	-2,62E-21
		light-reverse	-9,84E-22	-1,53E-21	-2,15E-21	-2,56E-21	-	-2,42E-21
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	dark-forward	2,96E-21	-9,76E-21	1,35E-20	5,30E-21	-	-1,32E-20
		dark-reverse	2,72E-21	-1,78E-22	1,80E-21	-4,34E-21	-	-2,11E-21
		light-forward	1,56E-20	2,04E-20	1,62E-20	5,36E-21	-	-6,89E-21
		light-reverse	9,64E-22	1,00E-21	6,54E-22	6,77E-22	-	-1,86E-22
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	dark-forward	4,61E-21	9,60E-21	2,48E-20	-	-	8,20E-21
		dark-reverse	3,26E-21	6,79E-21	7,56E-21	-	-	6,15E-22
		light-forward	4,63E-21	1,16E-20	1,04E-20	4,78E-21	-	2,10E-20
		light-reverse	2,02E-21	6,79E-21	2,15E-21	-7,96E-21	-	-1,23E-21
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	dark-forward	-1,13E-23	-	-1,33E-22	-	-2,45E-22	-
		dark-reverse	-2,14E-22	-	-2,37E-22	-	-3,87E-22	-
		light-forward	1,13E-21	-	1,15E-21	-	1,12E-21	-
		light-reverse	3,63E-23	-	5,26E-23	-	4,89E-23	-
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	dark-forward	2,10E-23	-	2,26E-23	-	-1,87E-20	-
		dark-reverse	2,43E-22	-	1,86E-22	-	-2,73E-20	-
		light-forward	1,49E-21	-	1,39E-21	-	5,33E-22	-
		light-reverse	5,39E-23	-	2,34E-22	-	-9,46E-23	-

Розрахований відгук по зміні опору r_s/r_0 .

№	Матеріал	r_s/r_0					
		Режим	10г	20г	50г	100г	200г
1	Foil Mo-CdS-Cu _x S	dark-forward	-5,35E-01	1,20E+00	1,20E+00	5,89E-01	-
		dark-reverse	-7,11E-01	-9,73E-01	-9,79E-01	-9,91E-01	-
		light-forward	-4,71E-02	2,55E-02	7,36E-02	9,95E-02	-
		light-reverse	-6,34E-02	7,92E-02	-1,46E-01	-5,30E-02	-
2	Foil Mo-CdS-Cu _x S	dark-forward	-	-7,46E-01	-7,37E-01	-7,64E-01	-
		dark-reverse	-	-9,63E-01	-9,40E-01	-9,77E-01	-
		light-forward	-3,96E-01	-3,93E-01	-3,93E-01	-3,93E-01	-
		light-reverse	-4,83E-01	-4,83E-01	-4,83E-01	-4,83E-01	-
3	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	dark-forward	-4,34E-02	-1,89E-01	-2,27E-01	-2,27E-01	-
		dark-reverse	-6,06E-01	-8,82E-01	-9,85E-01	-9,88E-01	-
		light-forward	-2,95E-02	-9,51E-02	-1,63E-01	-3,26E-02	-
		light-reverse	-6,48E-01	-8,67E-01	-6,97E-01	-9,13E-01	-
4	Foil Mo-CdS-ZnS-Cu _x S	dark-forward	1,91E-01	-1,40E-02	2,81E-01	2,26E-01	-
		dark-reverse	-8,32E-01	-8,16E-01	-7,77E-01	-7,08E-01	-
		light-forward	4,95E-02	1,91E-01	1,99E-01	1,74E-01	-
		light-reverse	-5,88E-01	-6,58E-02	-6,58E-02	-6,58E-02	-
5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	dark-forward	7,56E-01	5,37E-01	-2,46E-02	-	-
		dark-reverse	-2,93E-02	-4,95E-01	-8,22E-01	-	-
		light-forward	-1,43E-01	6,94E-01	2,39E+00	1,53E+00	-
		light-reverse	-4,25E-01	-1,94E-01	-4,93E-01	-4,93E-01	-
6	Foil Mo-	dark-forward	7,21E-01	2,48E+00	-5,81E-01	-	-

	CdS- CdTe- Cu _x S	dark-reverse	-	-	-	-	-
		light-forward	1,73E+00	3,78E-01	4,65E-01	-	-
		light-reverse	4,43E+01	7,23E-01	5,60E-01	-	-
7	Glasscer amic Mo- CdS- CdTe- Cu _x S	dark-forward	-8,37E-03	-	-5,52E-02	-	-7,49E-02
		dark-reverse	-4,79E-03	-	-1,55E-02	-	-2,40E-02
		light-forward	3,55E-01	-	3,55E-01	-	3,55E-01
		light-reverse	-2,56E-01	-	-2,56E-01	-	-2,56E-01
8	Glasscer amic Mo- CdS- CdTe- Cu _x S	dark-forward	-8,26E-02	-	-4,69E-02	-	-
		dark-reverse	1,78E-01	-	1,68E-01	-	-
		light-forward	3,97E-01	-	3,97E-01	-	-
		light-reverse	5,58E-02	-	5,58E-02	-	5,58E-02

Табл. 3.23.

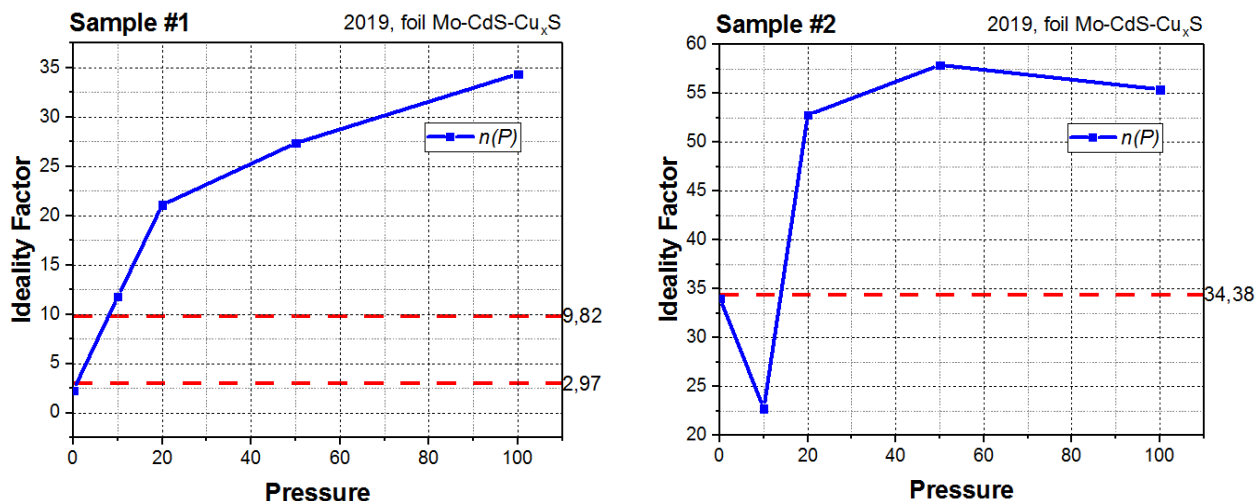
Чутливість зразку S.

№	Матеріал	S							
		Режим	Без тиску	10г	20г	50г	100г	200г	Деформація скручування
1	Foil Mo-CdS- Cu _x S	forward	14,11	9,189	9,235	11,117	9,876	-	-
		reverse	16599	3385	468	407	160	-	-
2	Foil Mo-CdS- Cu _x S	forward	25,7	9,15	21,92	-0,56	-	-	13,54
		reverse	2880	-3,42	-5,245	-27,79	23,45	-	219,51
3	Foil Mo-CdS- ZnS-Cu _x S	forward	162,24	191,64	143,38	56,78	52,69	-	-0,98
		reverse	3832	2350	955	281	269	-	-0,999
4	Foil Mo-CdS- ZnS-Cu _x S	forward	7,17	7,81	7,65	8,27	9,25	-	5,62
		reverse	1446,9	394,1	293,7	612,5	607,2	-	246,2

5	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	forward	8,22	-0,57	-0,994	3,78	8,07	-	0,985
		reverse	22,92	35,54	16,992	30,5	6,11	-	14,04
6	Foil Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	forward	-0,356	-0,359	-0,60474	19,929	-	-	-0,97
		reverse	16,38	22,44	16,39	63,19	-	-	26,15
7	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	forward	6,66	4,82	-	4,62	-	4,51	-
		reverse	1016,9	957,2	-	948	-	915,1	-
8	Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu _x S	forward	10,2	6,85	-	7,04	-	-0,89	-
		reverse	1165	1219	-	1151	-	0,65	-

Також для додаткового аналізу отриманих структур були побудовані наступні залежності (рис. 3.3-3.138):

Рис. 3.3-3.10. Залежність коефіцієнту неідеальності від тиску для 8-ми досліджуваних зразків. (Червона пунктирна лінія для випадку скуручування)



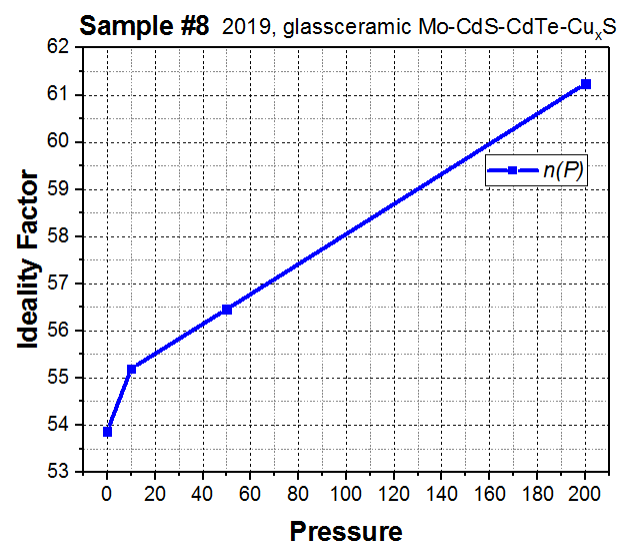
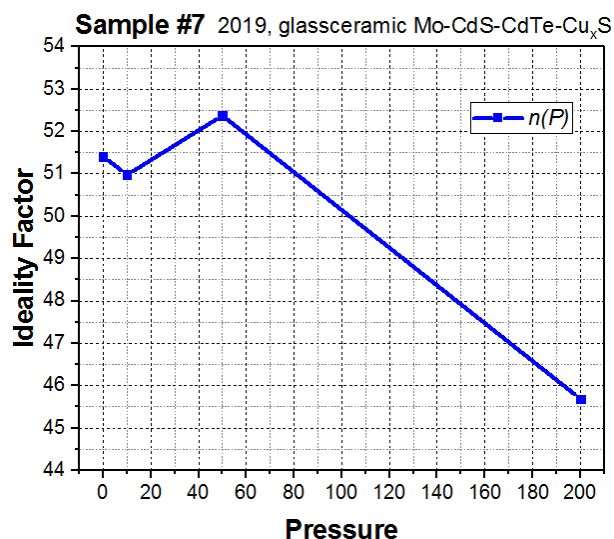
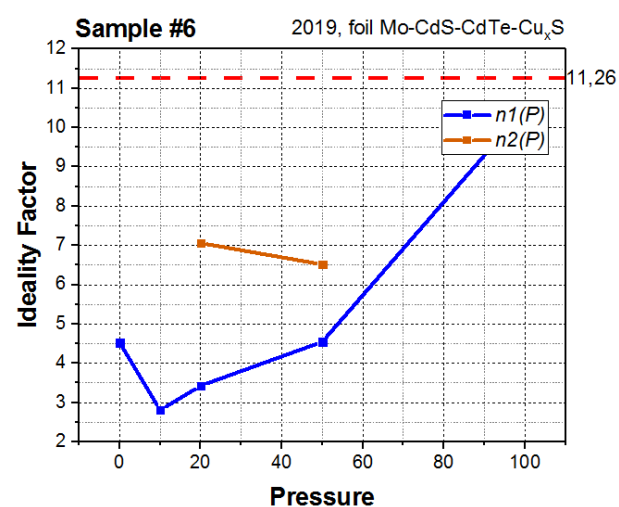
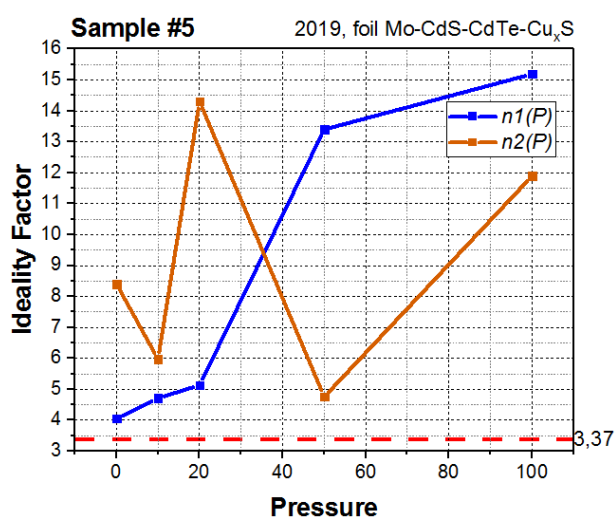
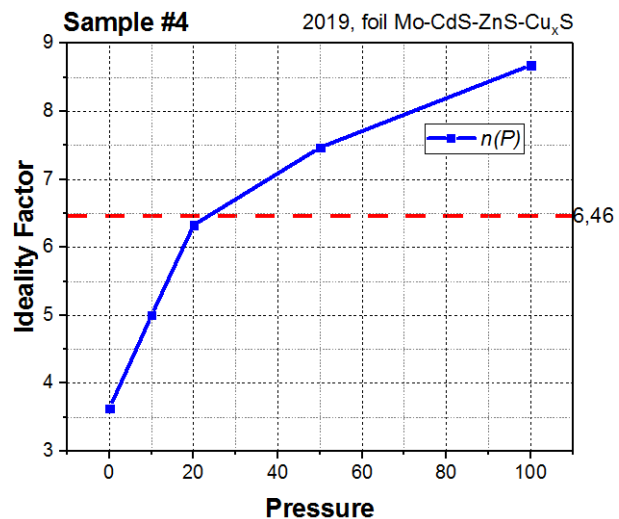
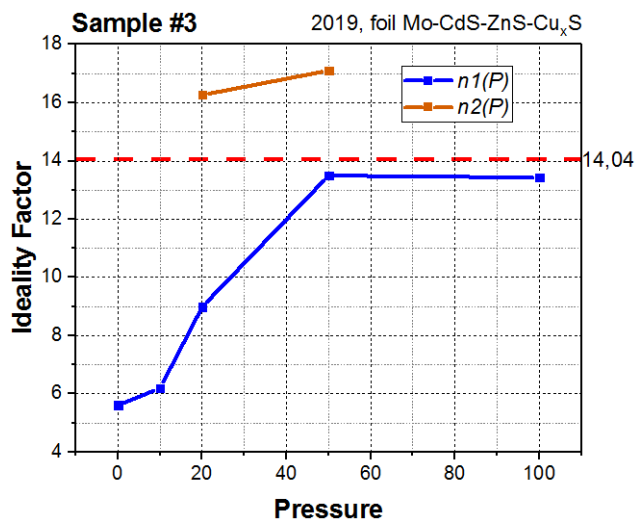
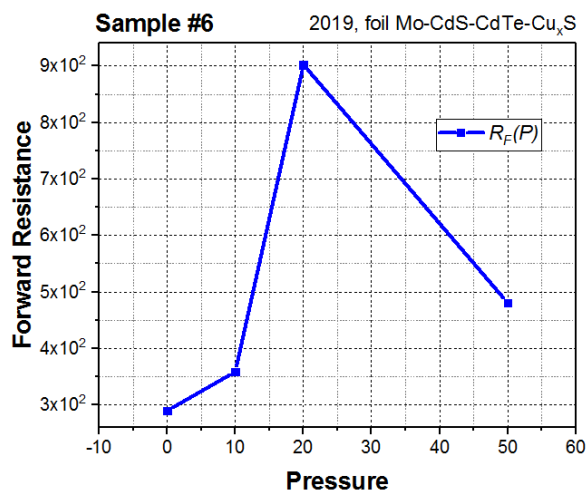
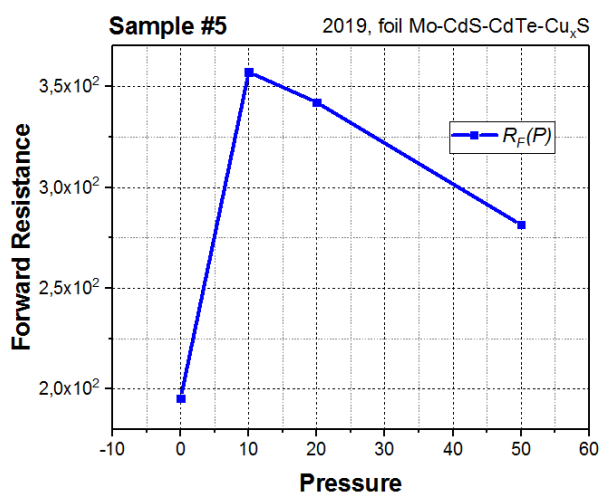
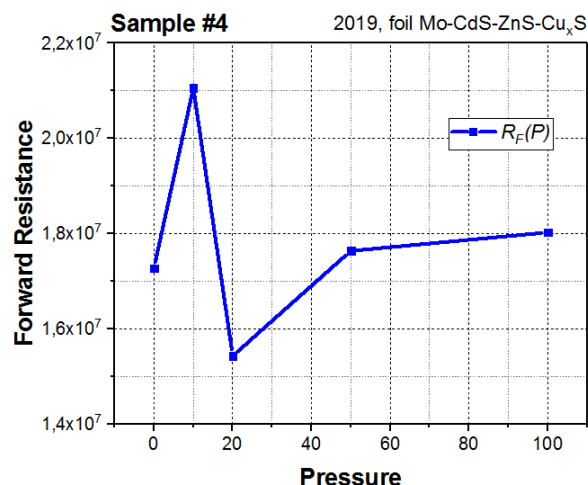
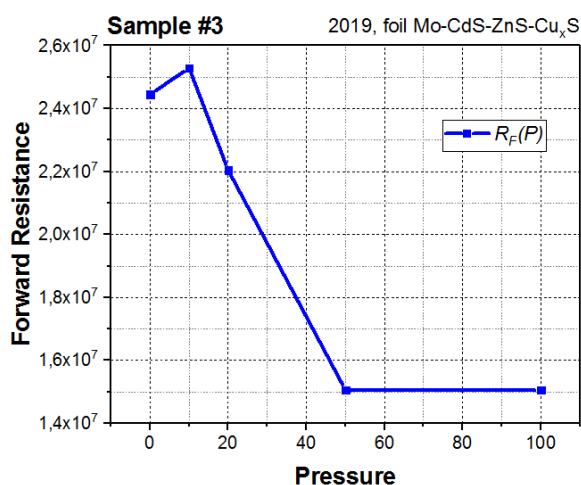
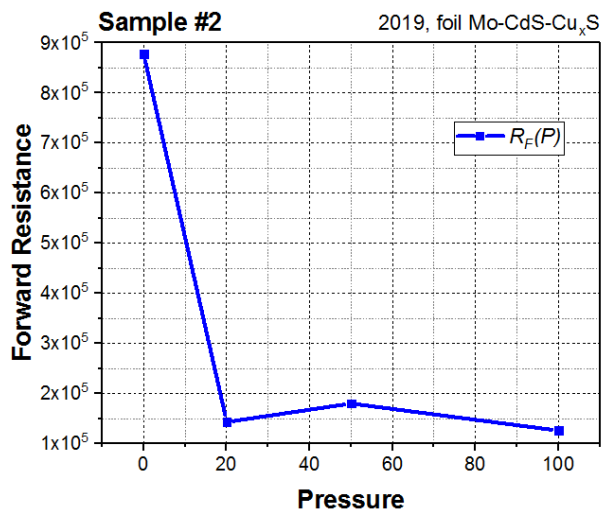
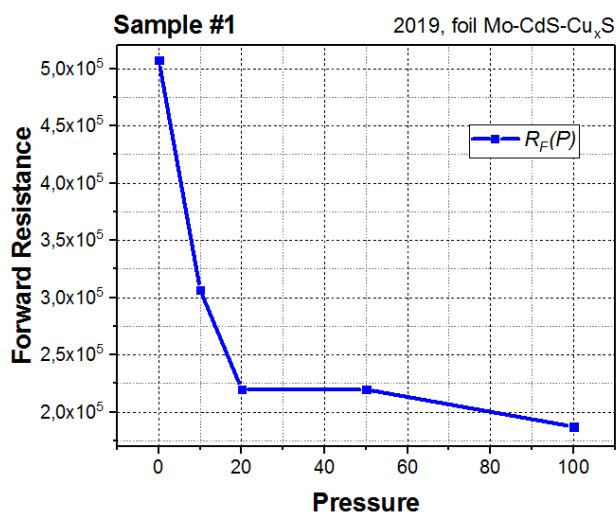


Рис. 3.11-3.18. Залежність прямого опору по постійному струму від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в темновому режимі.



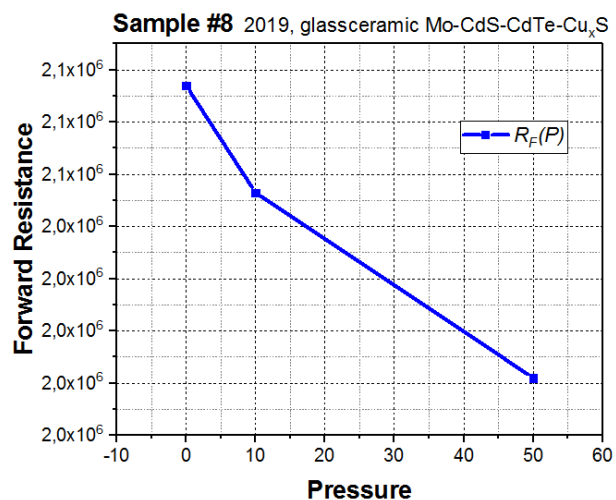
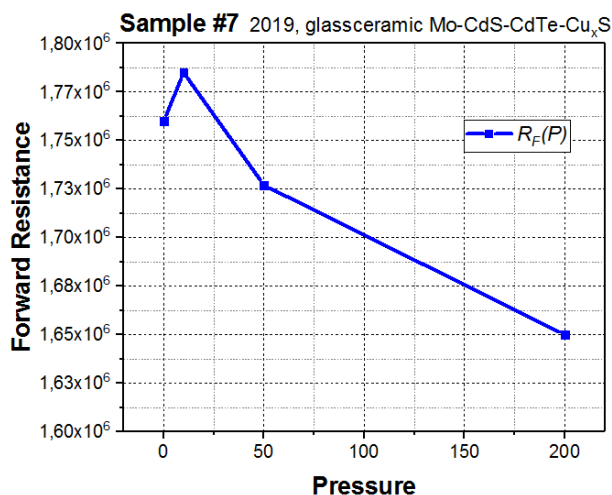
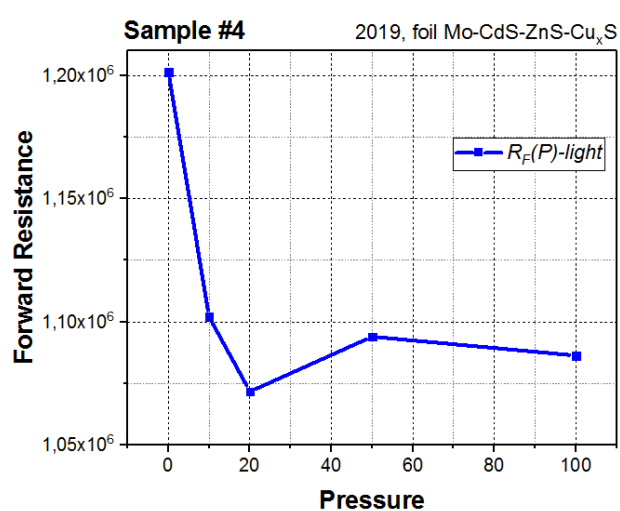
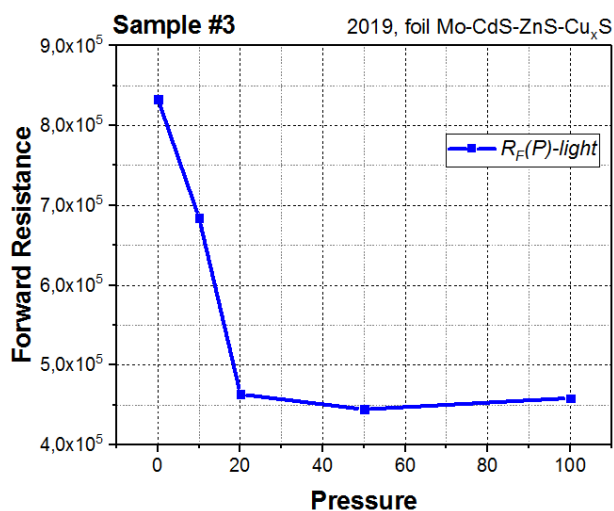
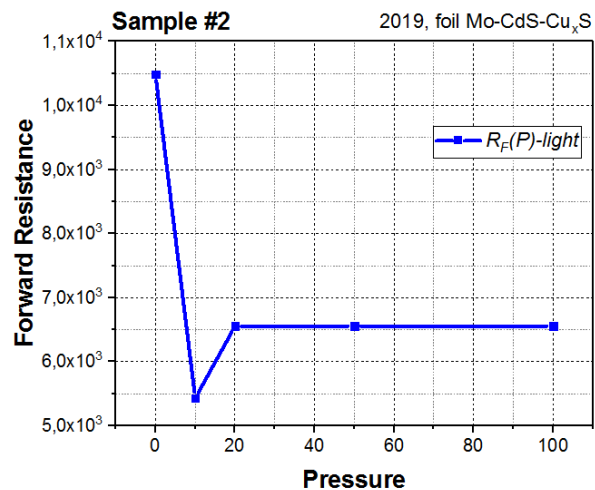
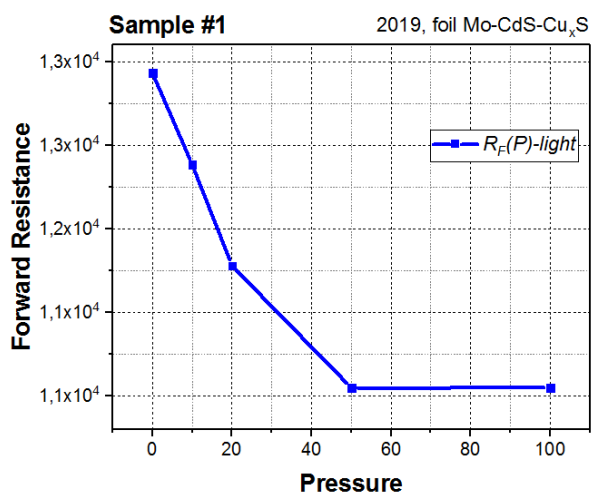


Рис. 3.19-3.26. Залежність прямого опору по постійному струму від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в світловому режимі.



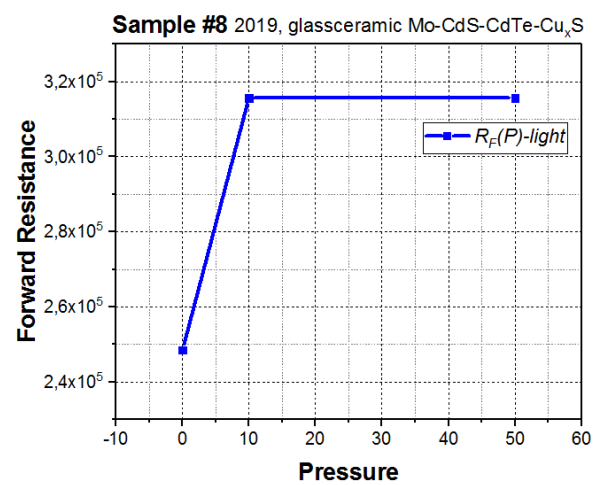
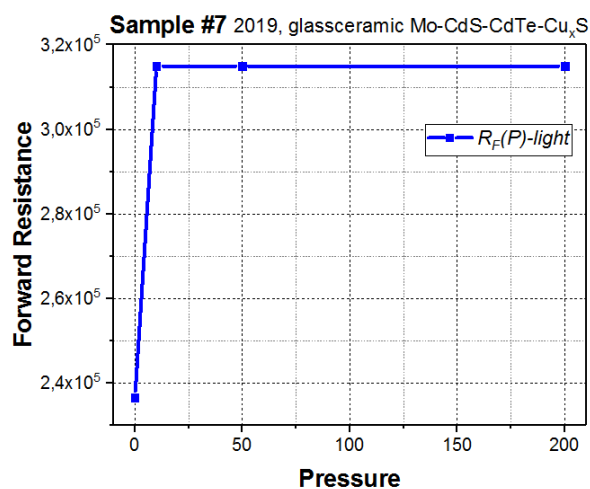
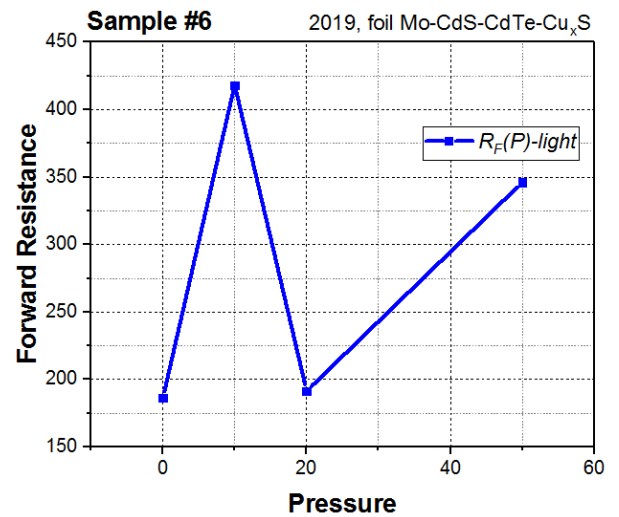
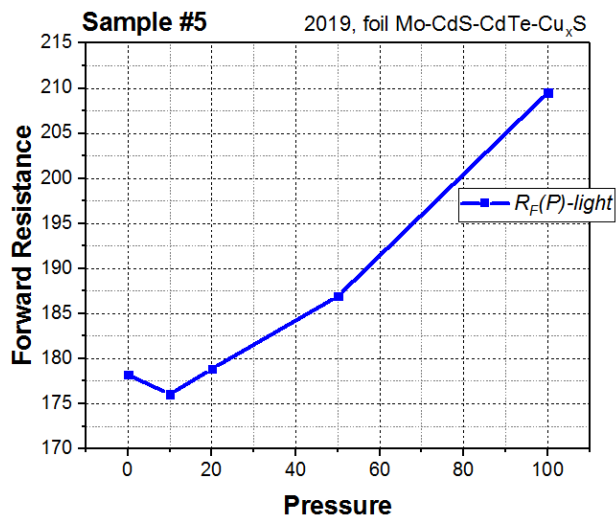
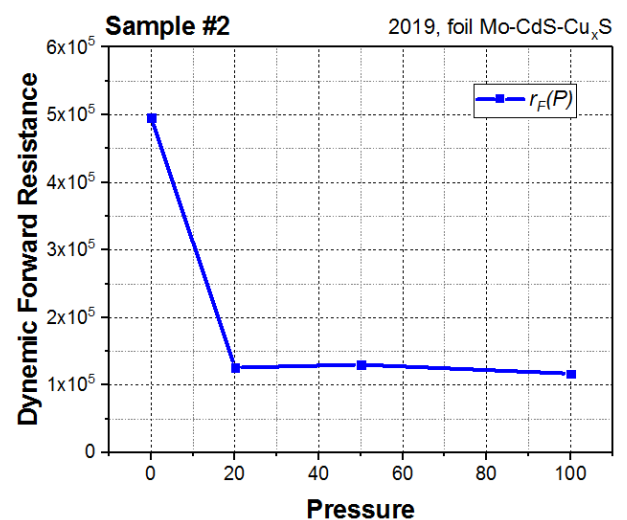
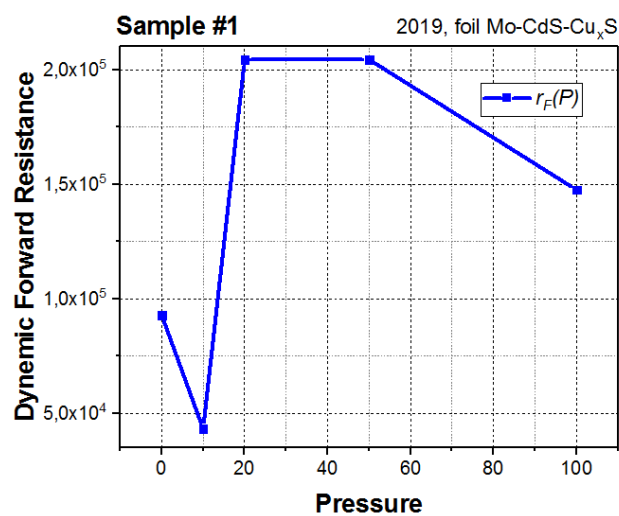


Рис. 3.27-3.34. Залежність прямого диференційного опору від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в темновому режимі.



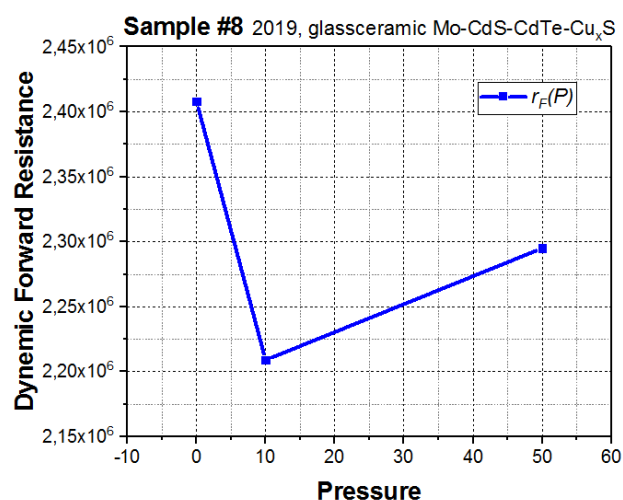
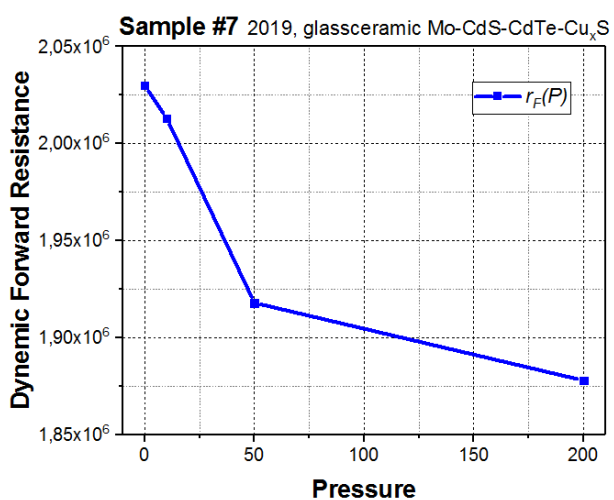
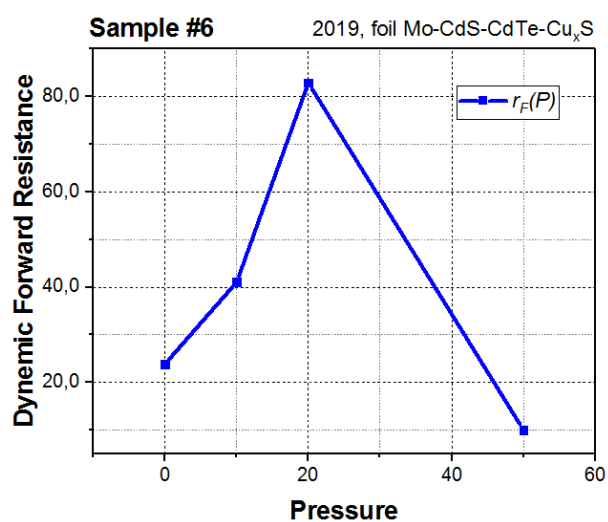
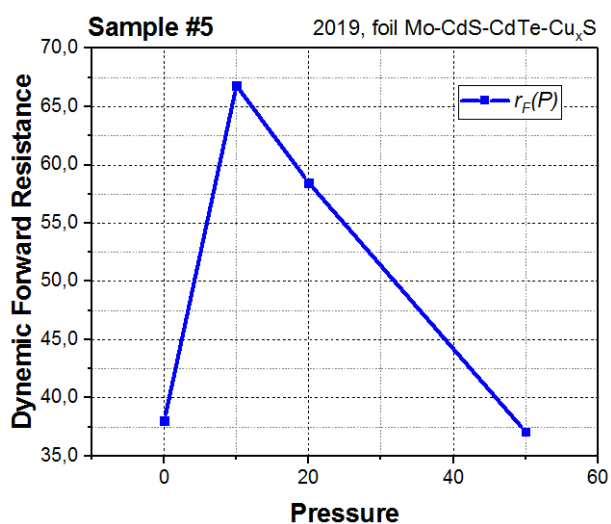
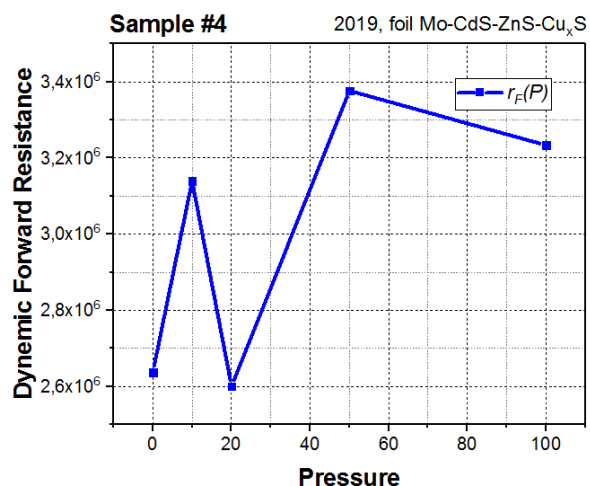
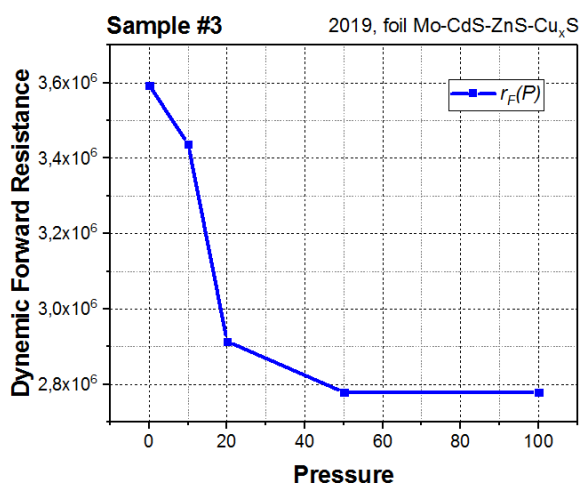
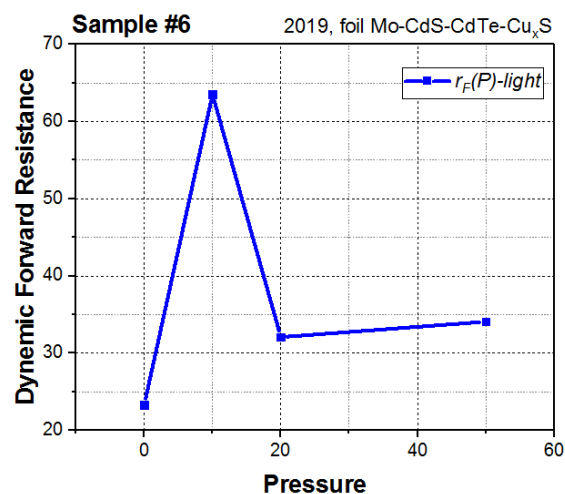
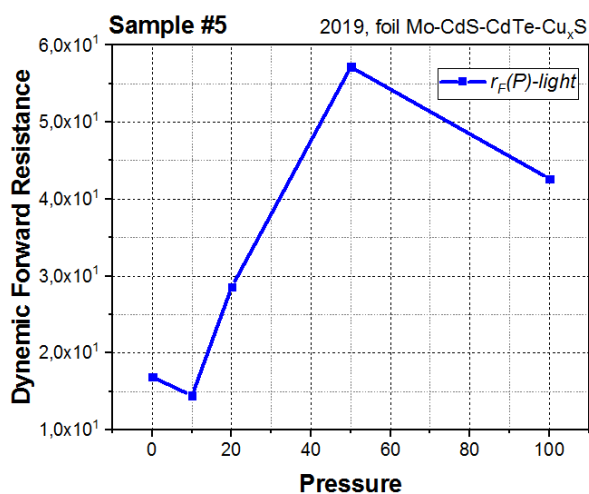
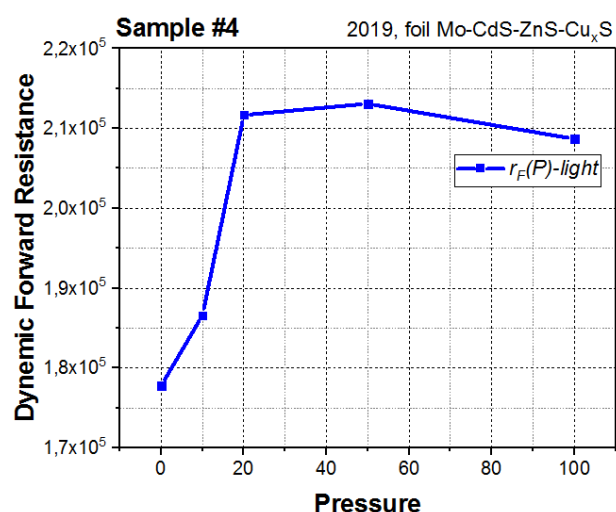
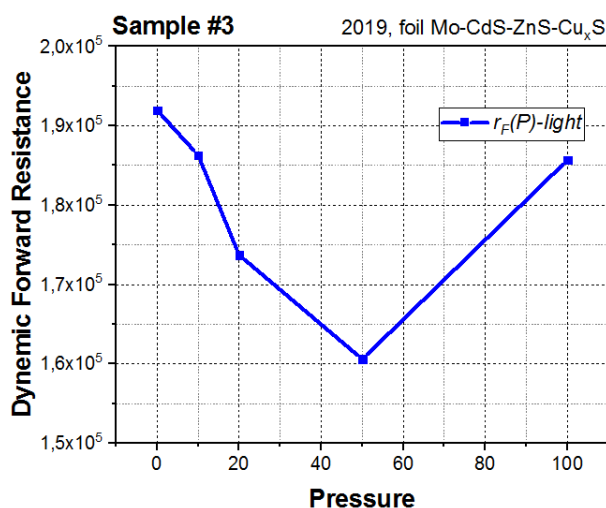
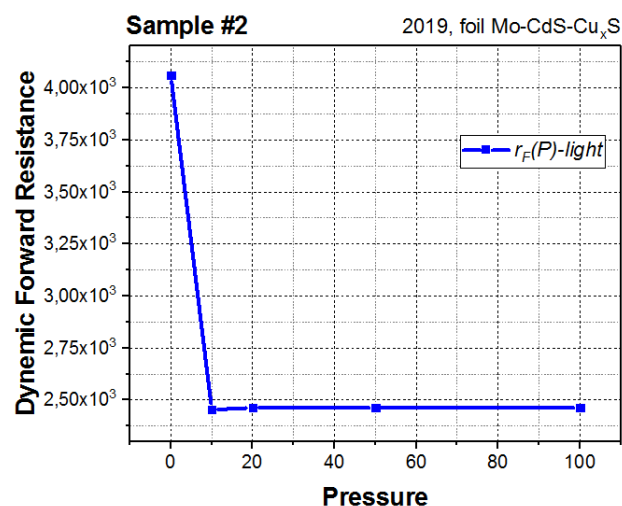
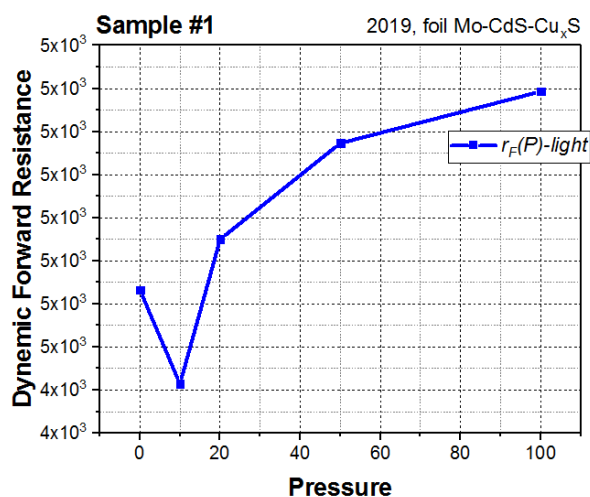


Рис. 3.35-3.42. Залежність прямого диференційного опору від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в світловому режимі.



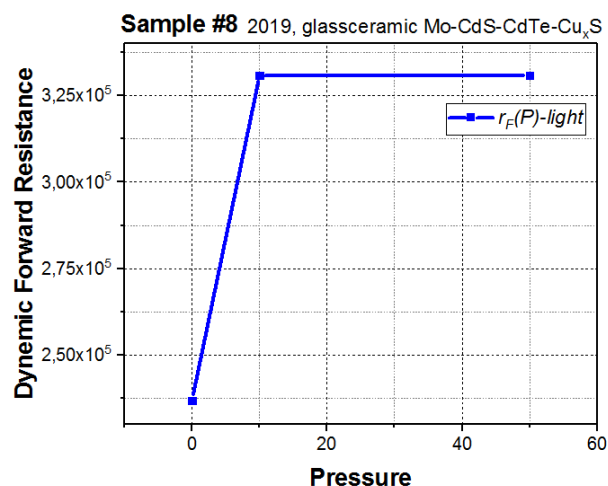
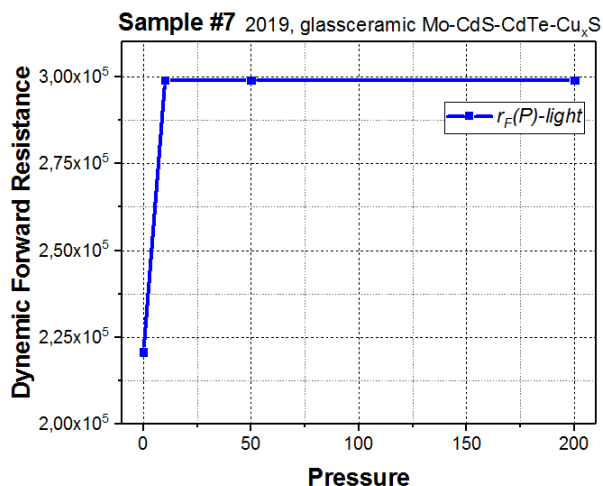
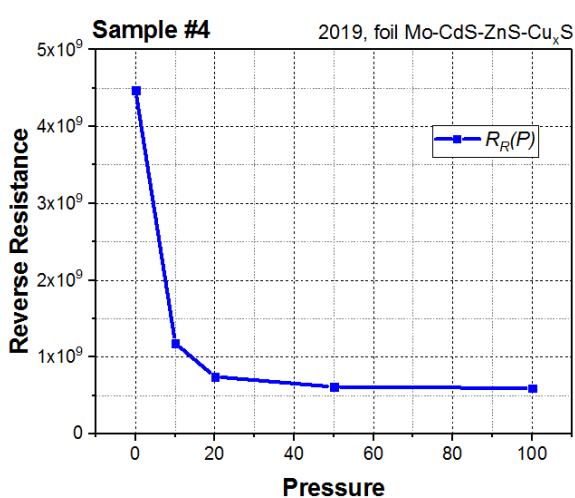
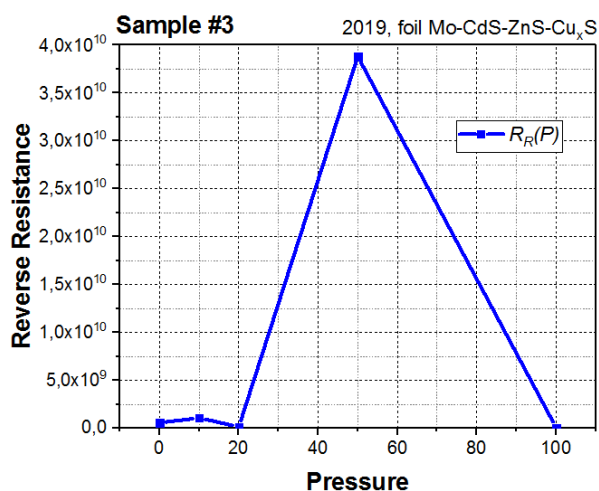
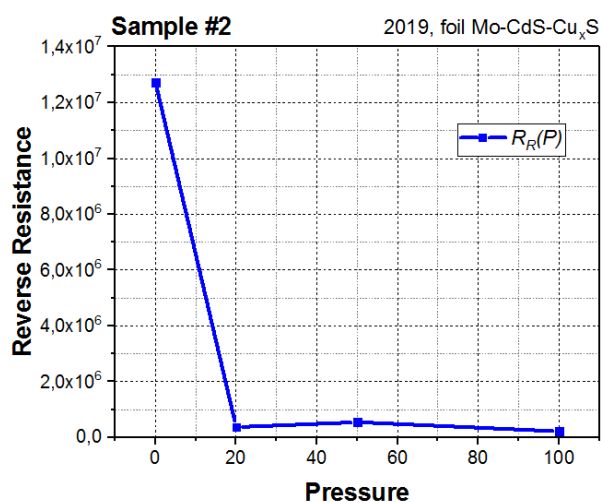
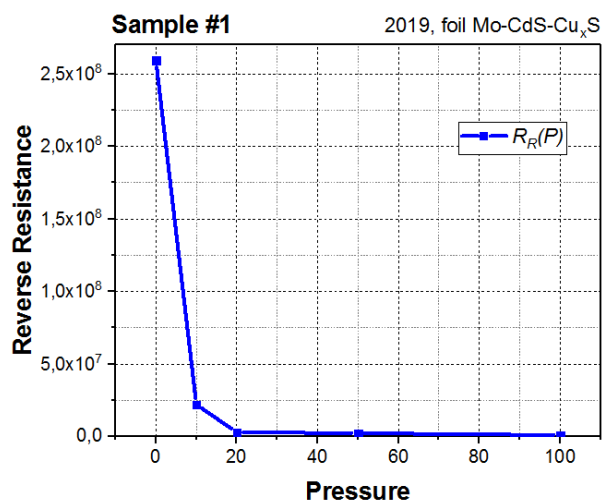


Рис. 3.43-3.50. Залежність зворотного опору по постійному струму від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в темновому режимі.



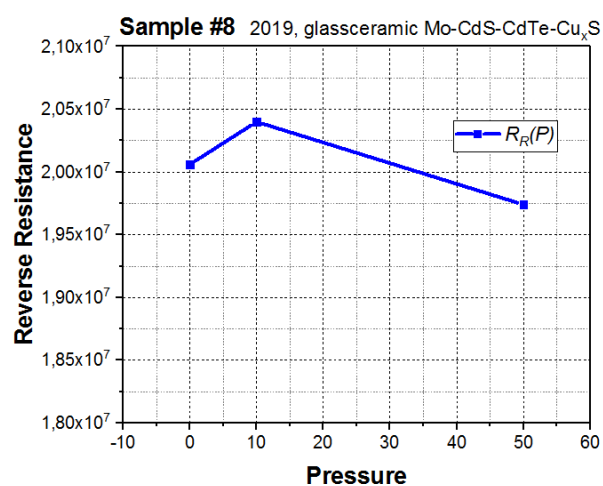
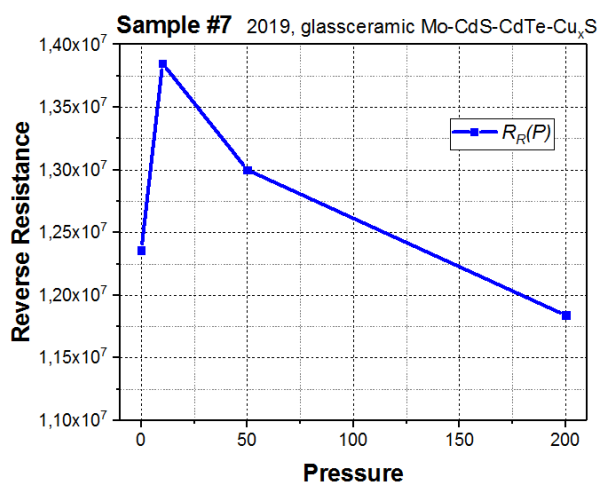
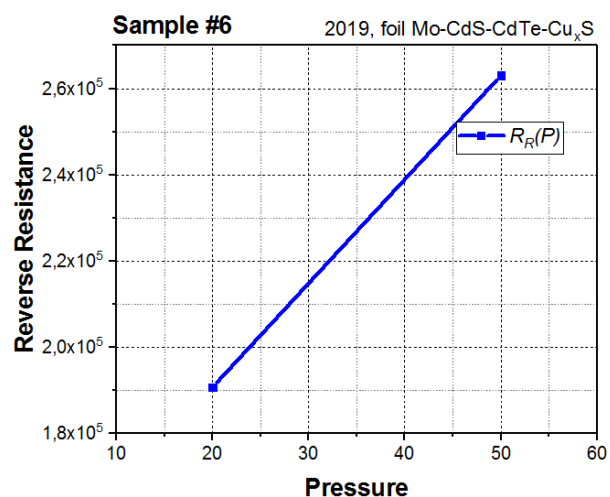
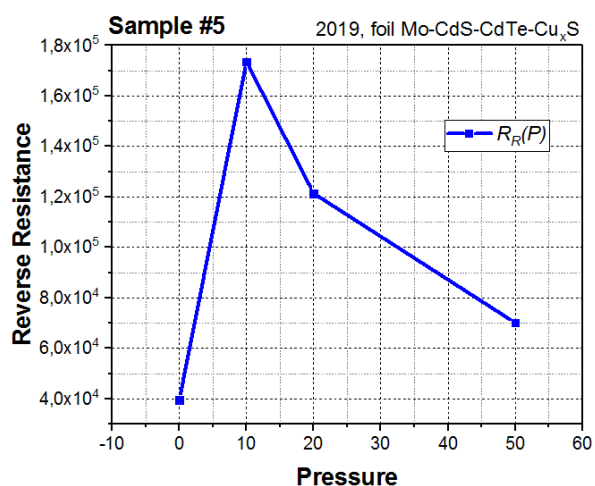
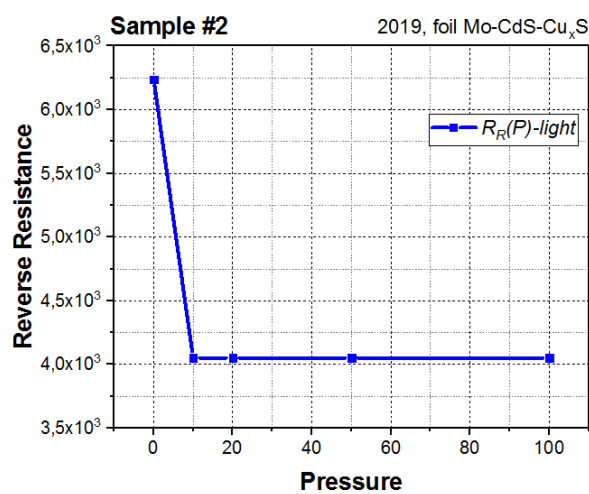
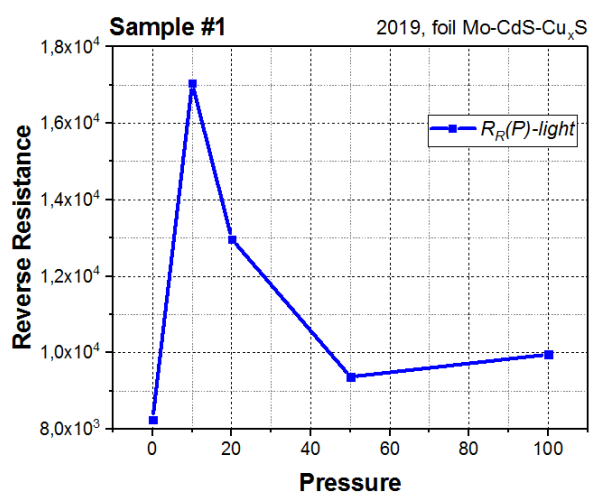


Рис. 3.51-3.58. Залежність зворотного опору по постійному струму від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в світловому режимі.



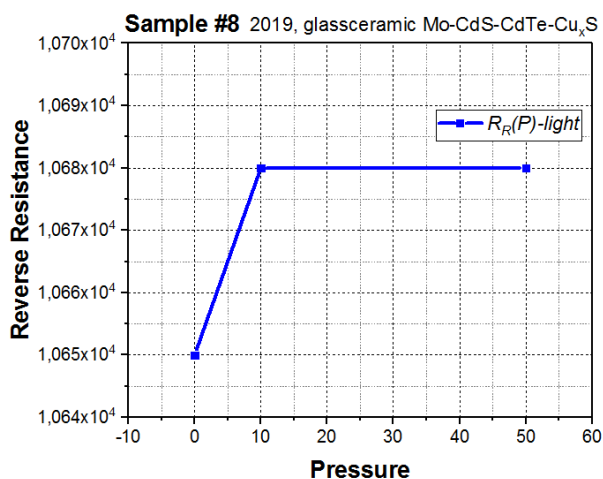
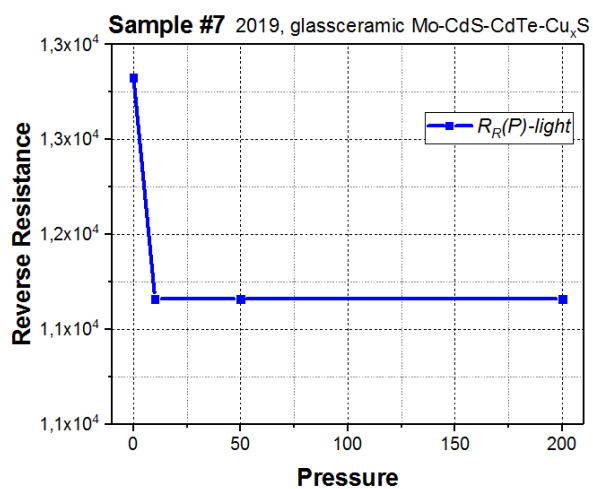
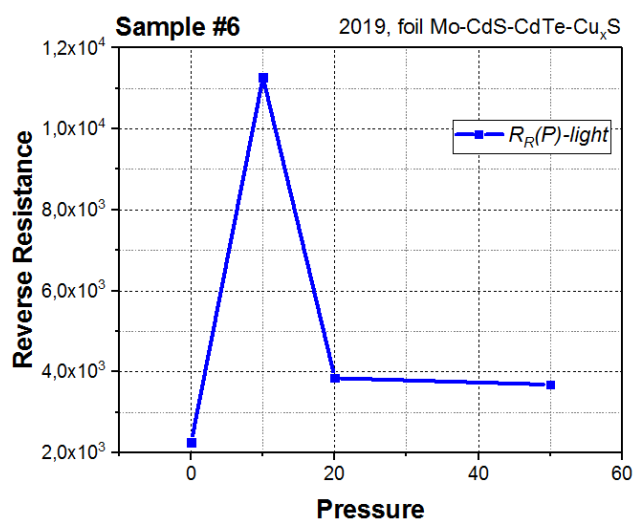
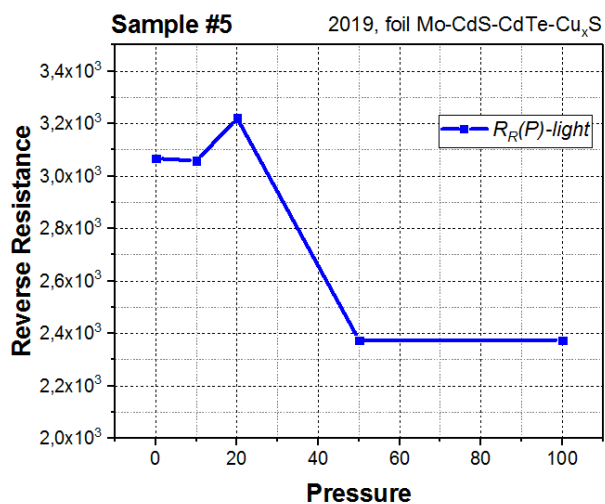
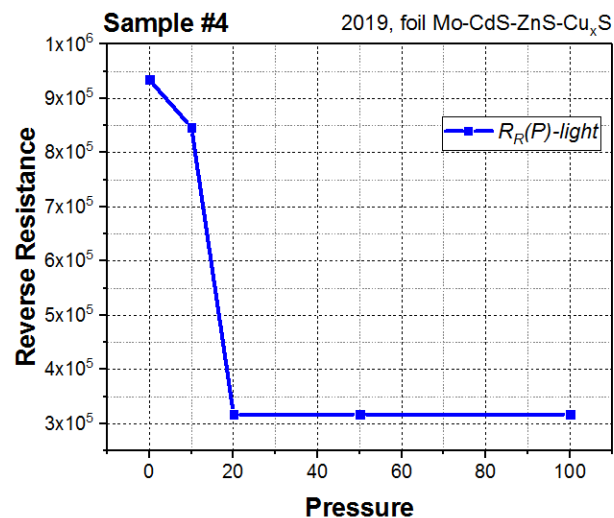
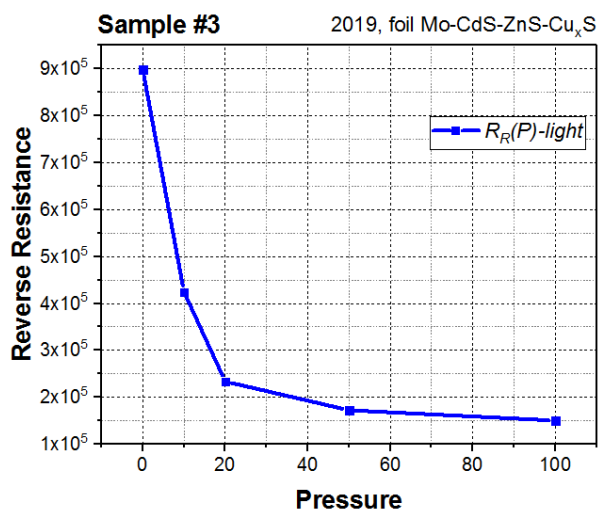
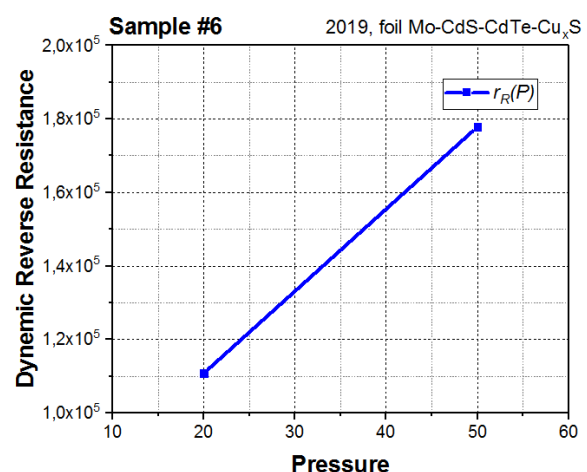
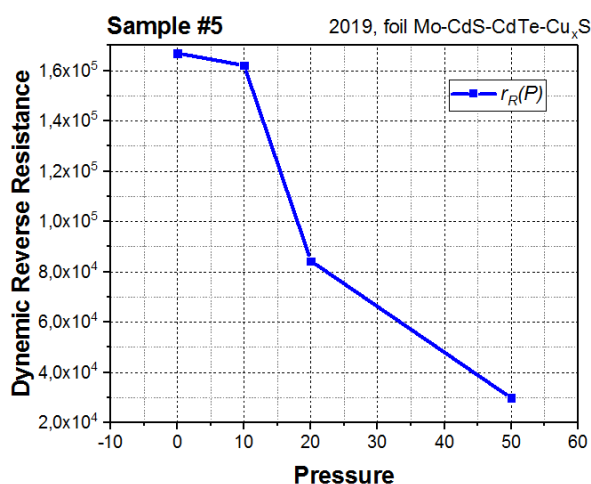
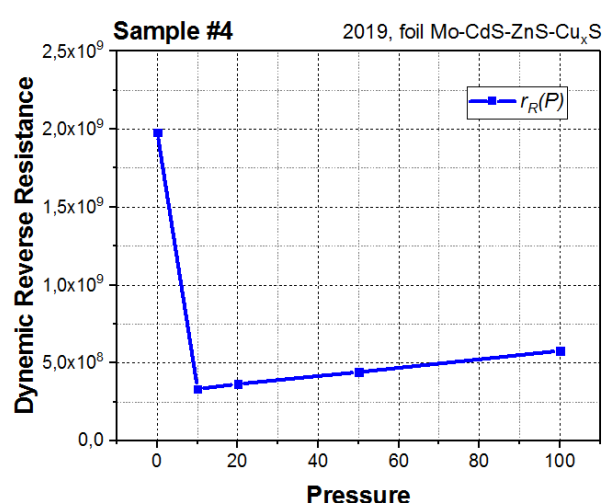
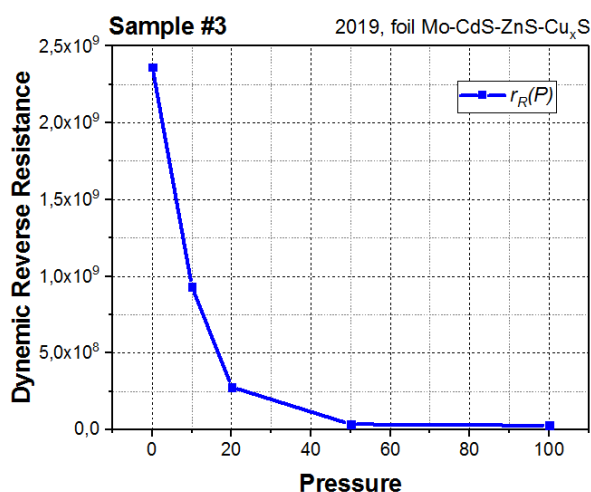
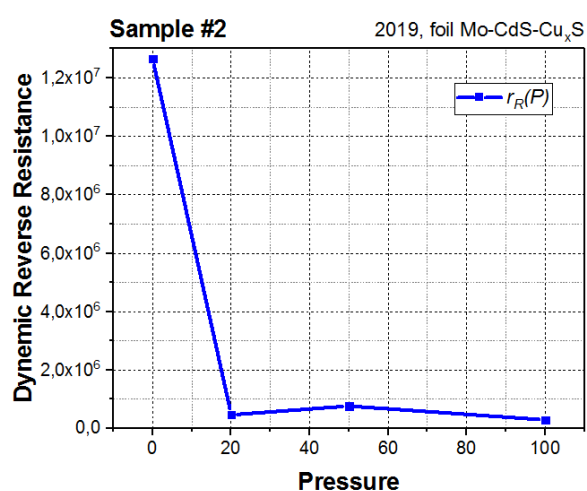
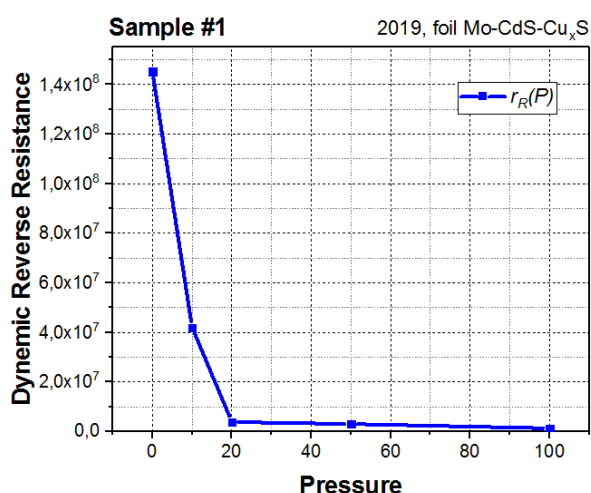


Рис. 3.59-3.66. Залежність зворотного диференційного опору від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в темновому режимі.



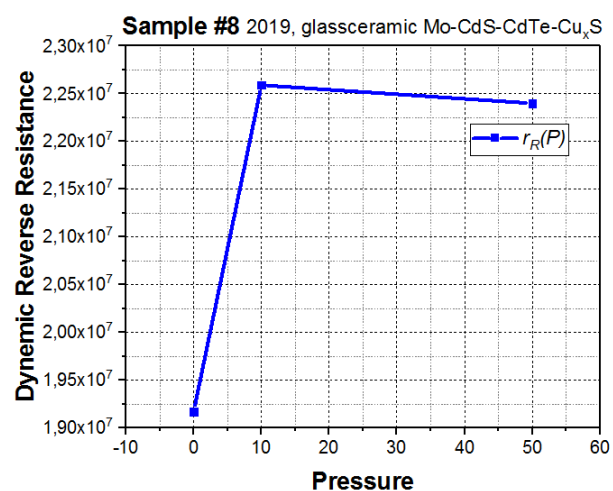
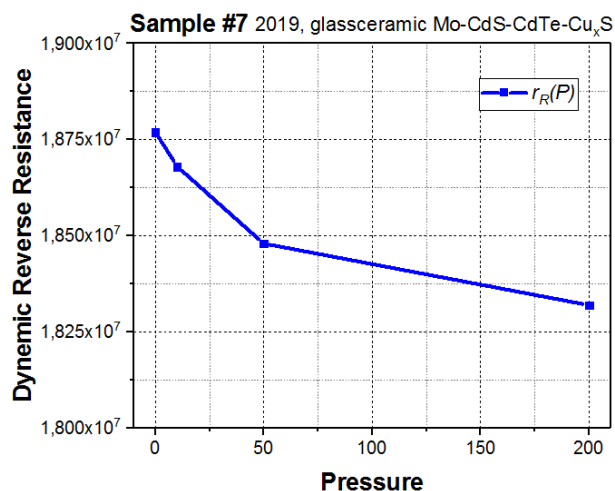
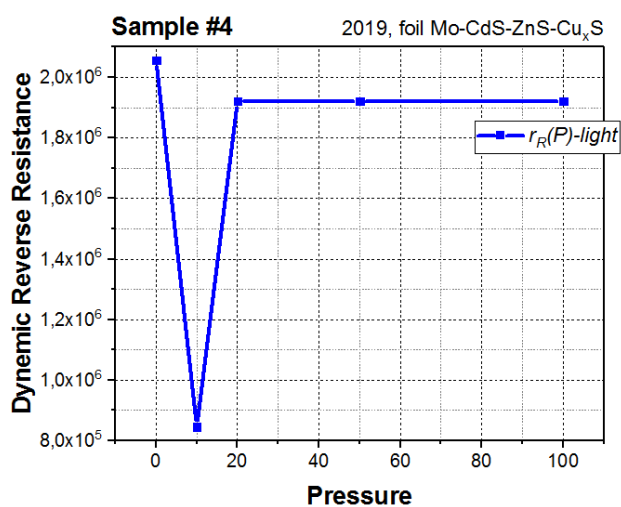
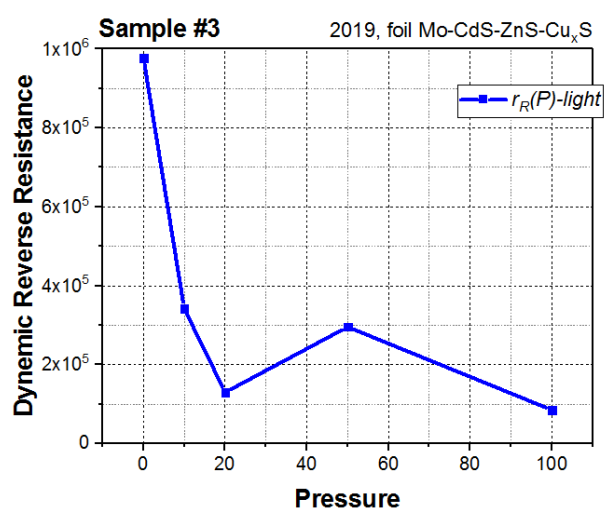
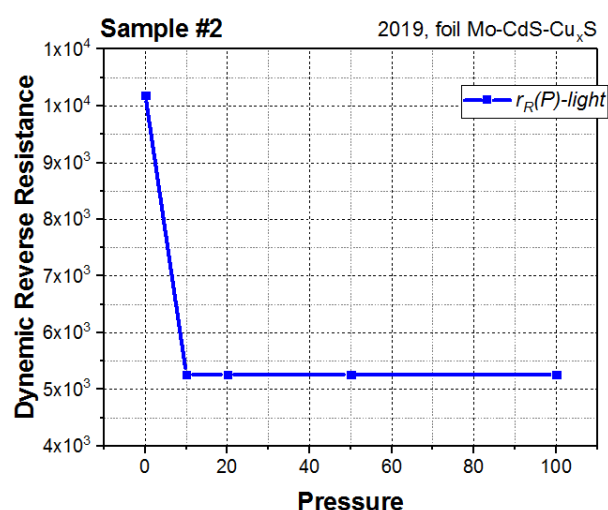
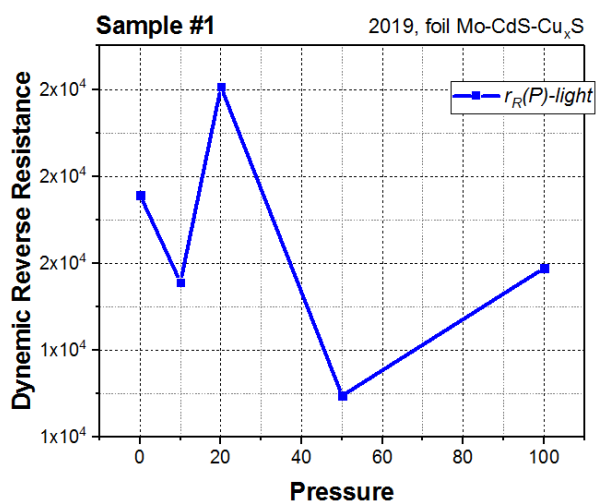


Рис. 3.67-3.74. Залежність зворотного диференційного опору від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в світловому режимі.



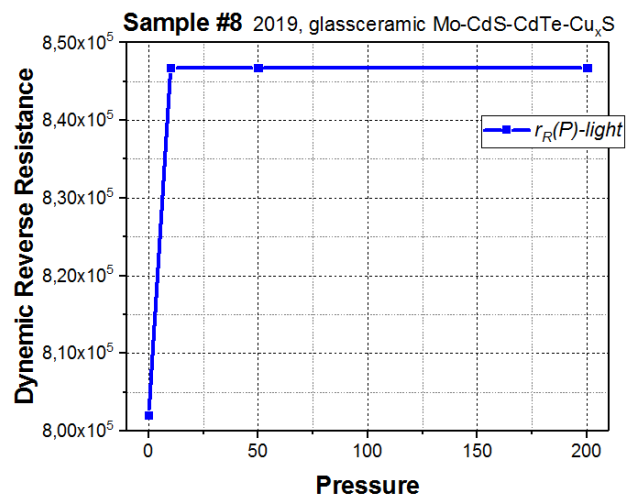
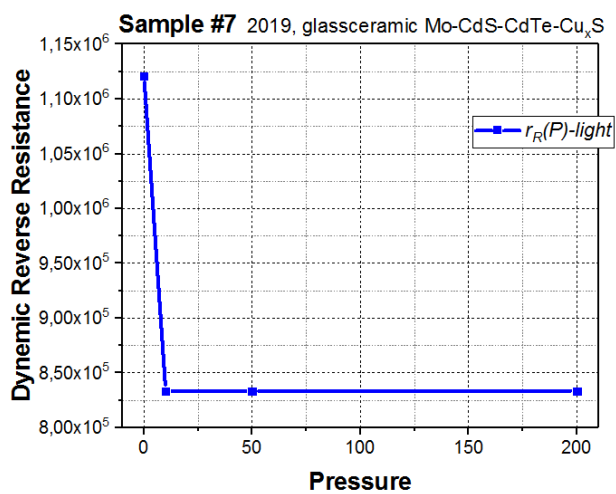
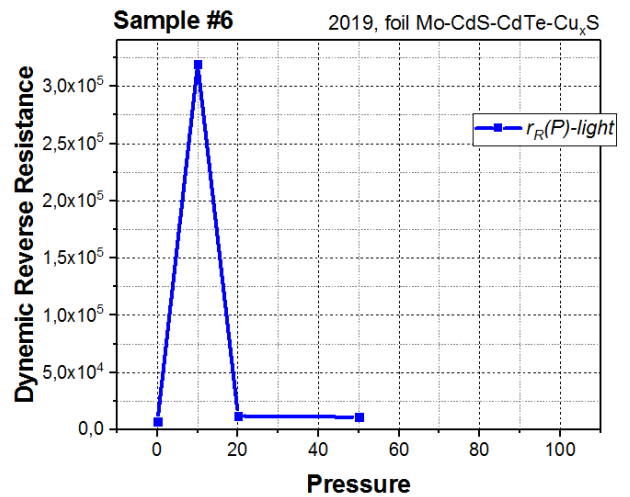
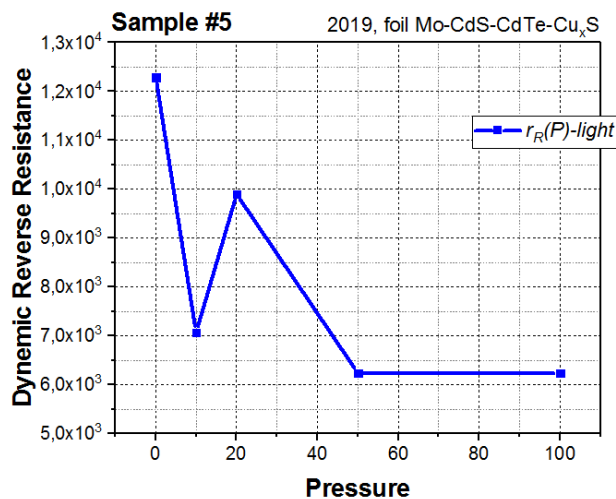
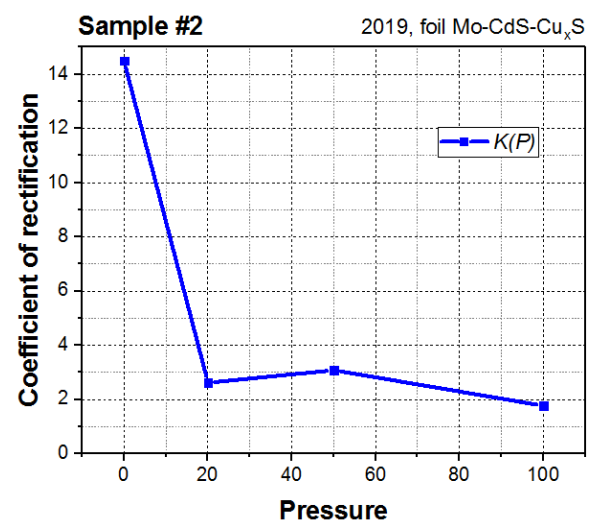
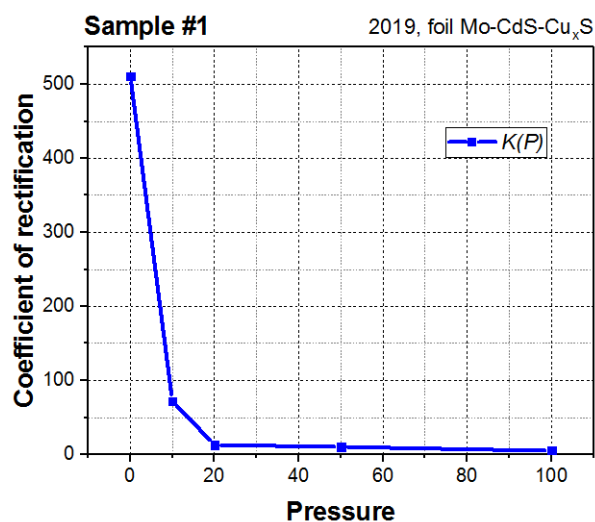
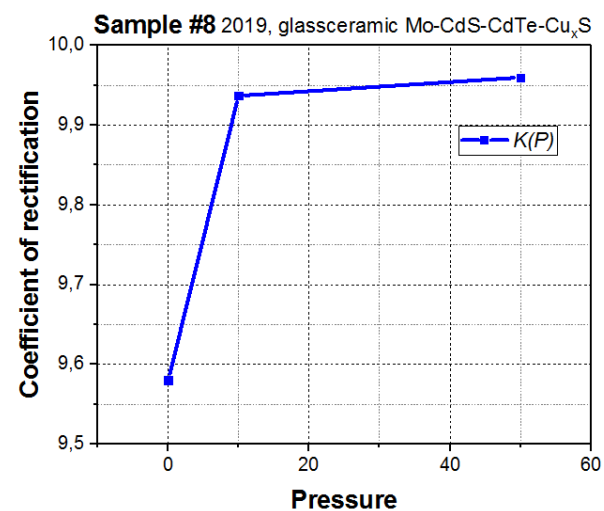
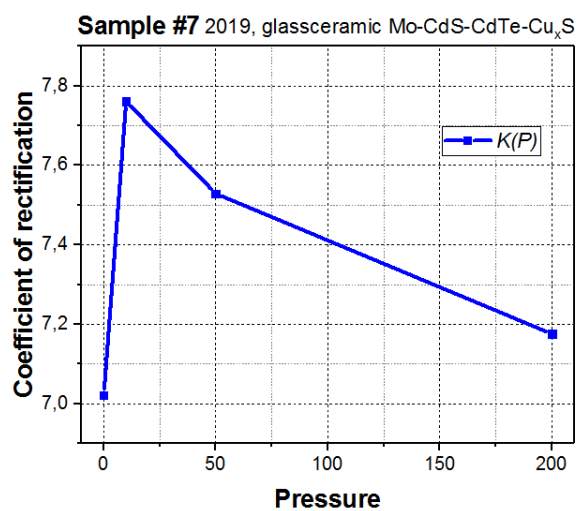
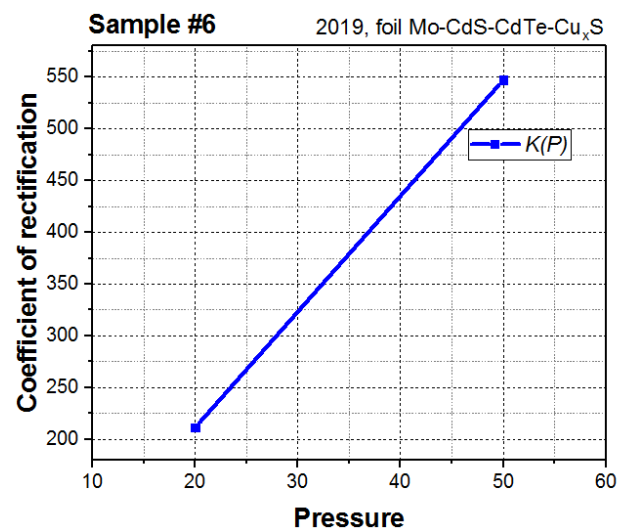
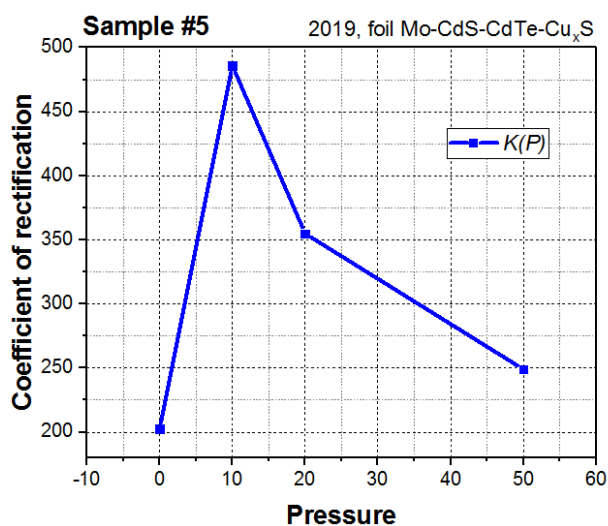
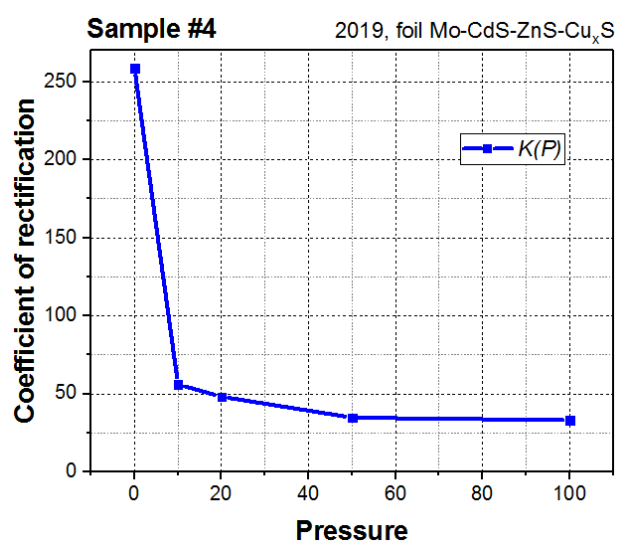
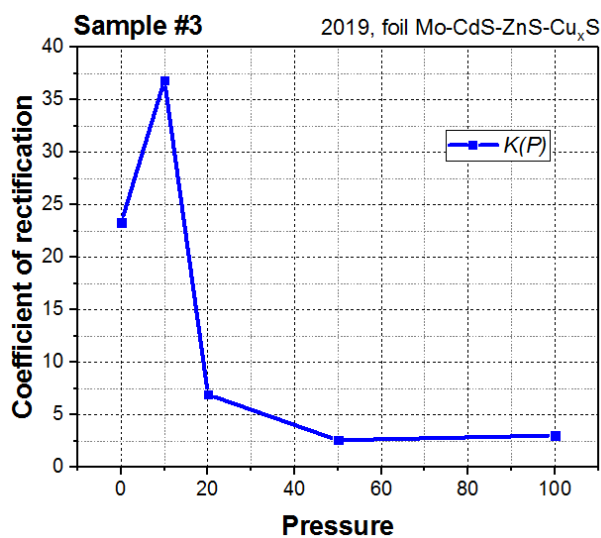


Рис. 3.75-3.82. Залежність коефіцієнту випрямлення від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в темновому режимі.





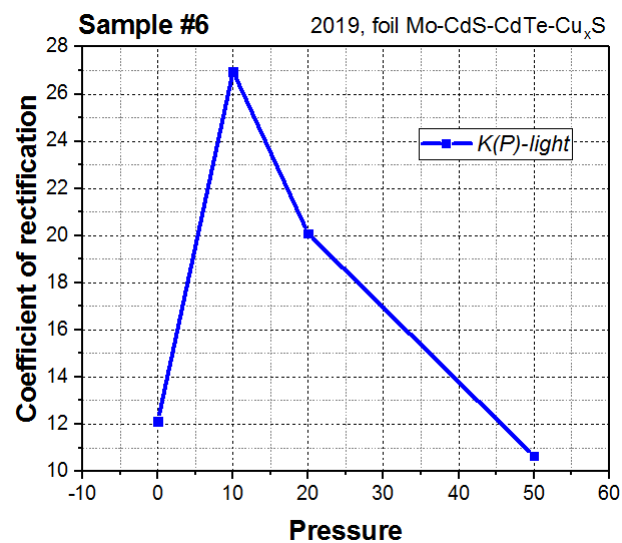
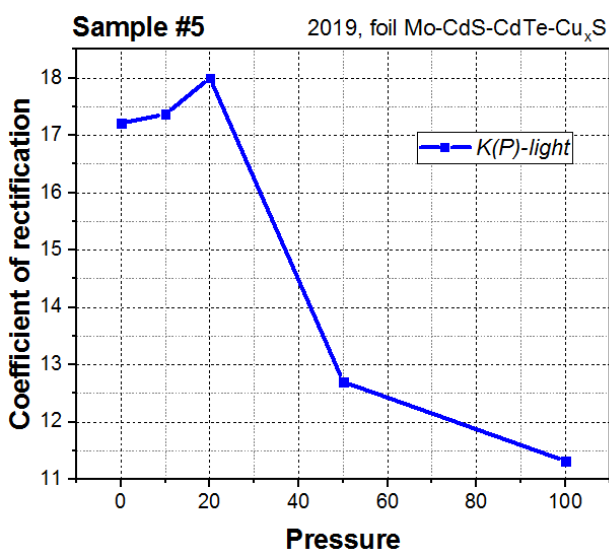
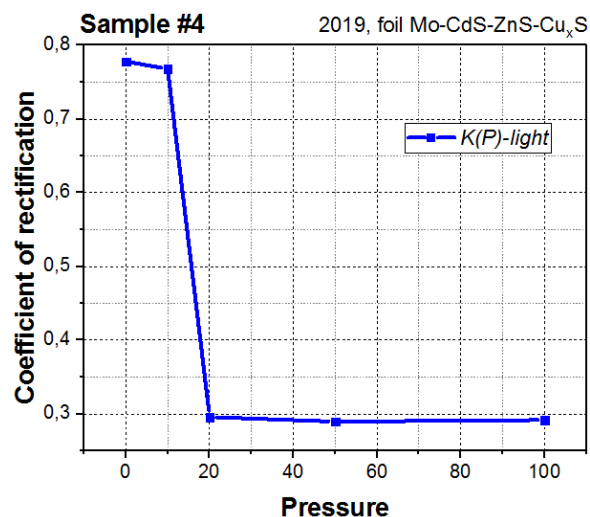
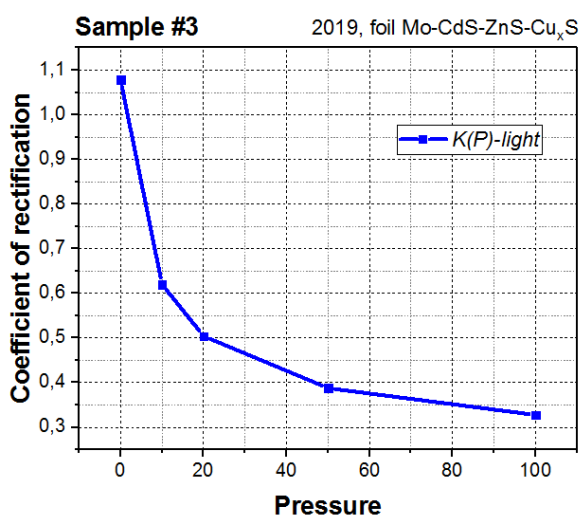
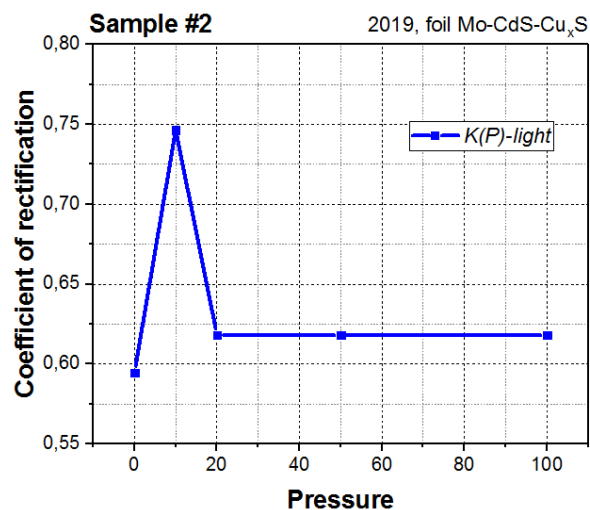
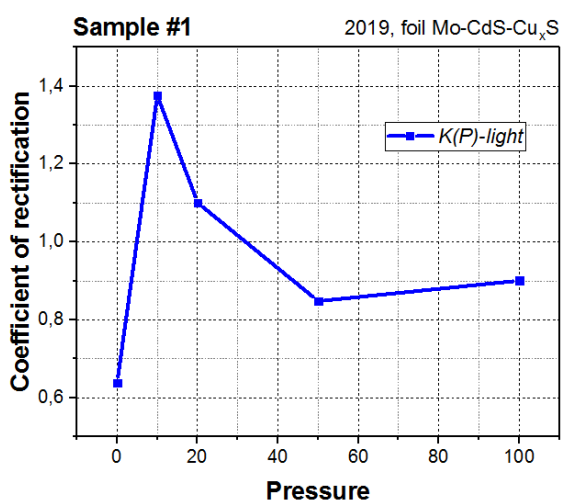
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРП 171.081.007 ПЗ

Арк.

83

Рис. 3.83-3.90. Залежність коефіцієнту випрямлення від тиску для 8-ми досліджуваних зразків в світловому режимі.



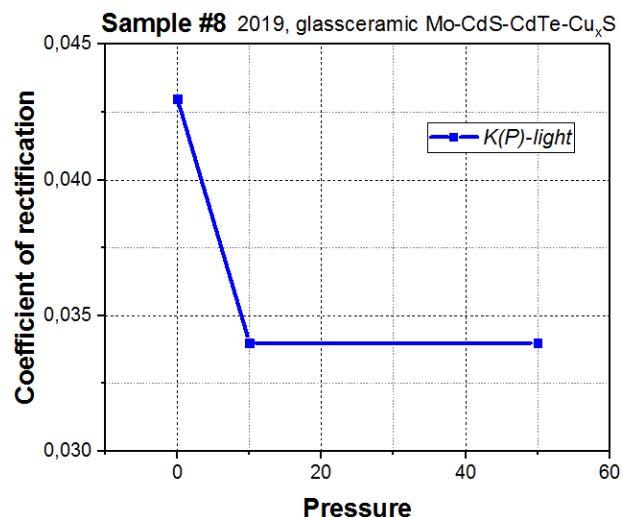
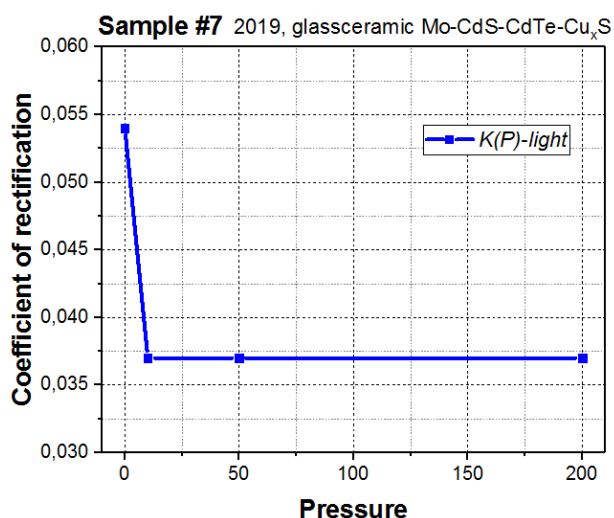


Рис. 3.91-3.94. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №1 в темновому та світловому режимах. (Надалі червона пунктирна лінія відповідатиме режиму скручування)

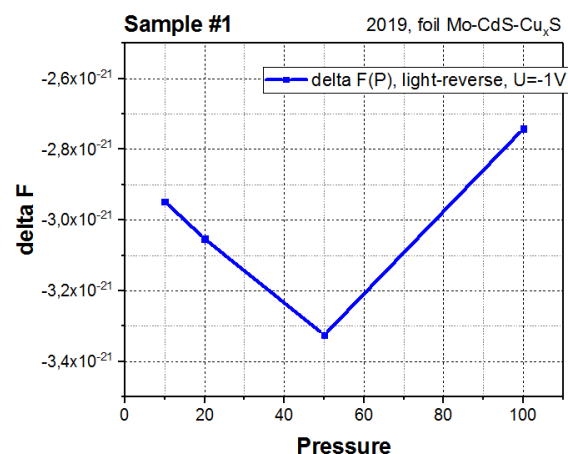
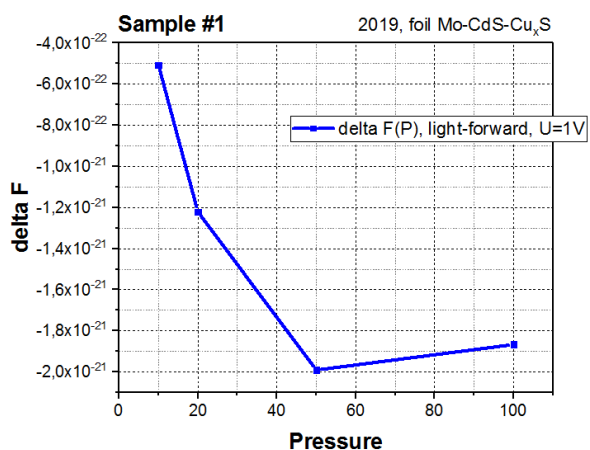
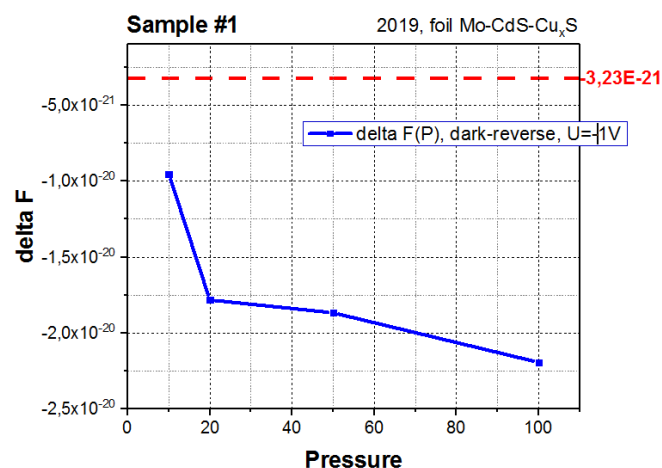
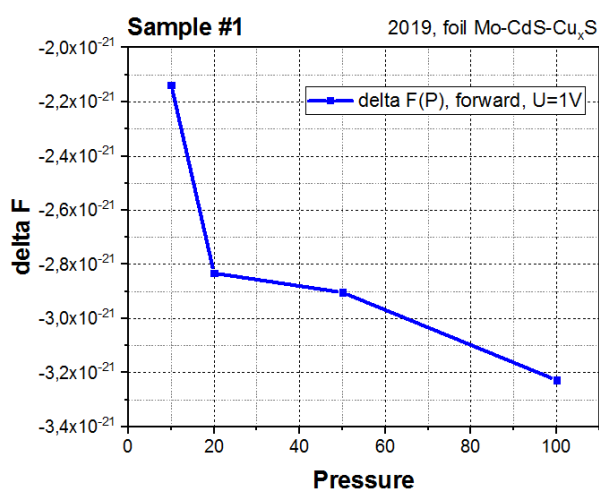


Рис. 3.95-3.98. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №2 в темновому та світловому режимах.

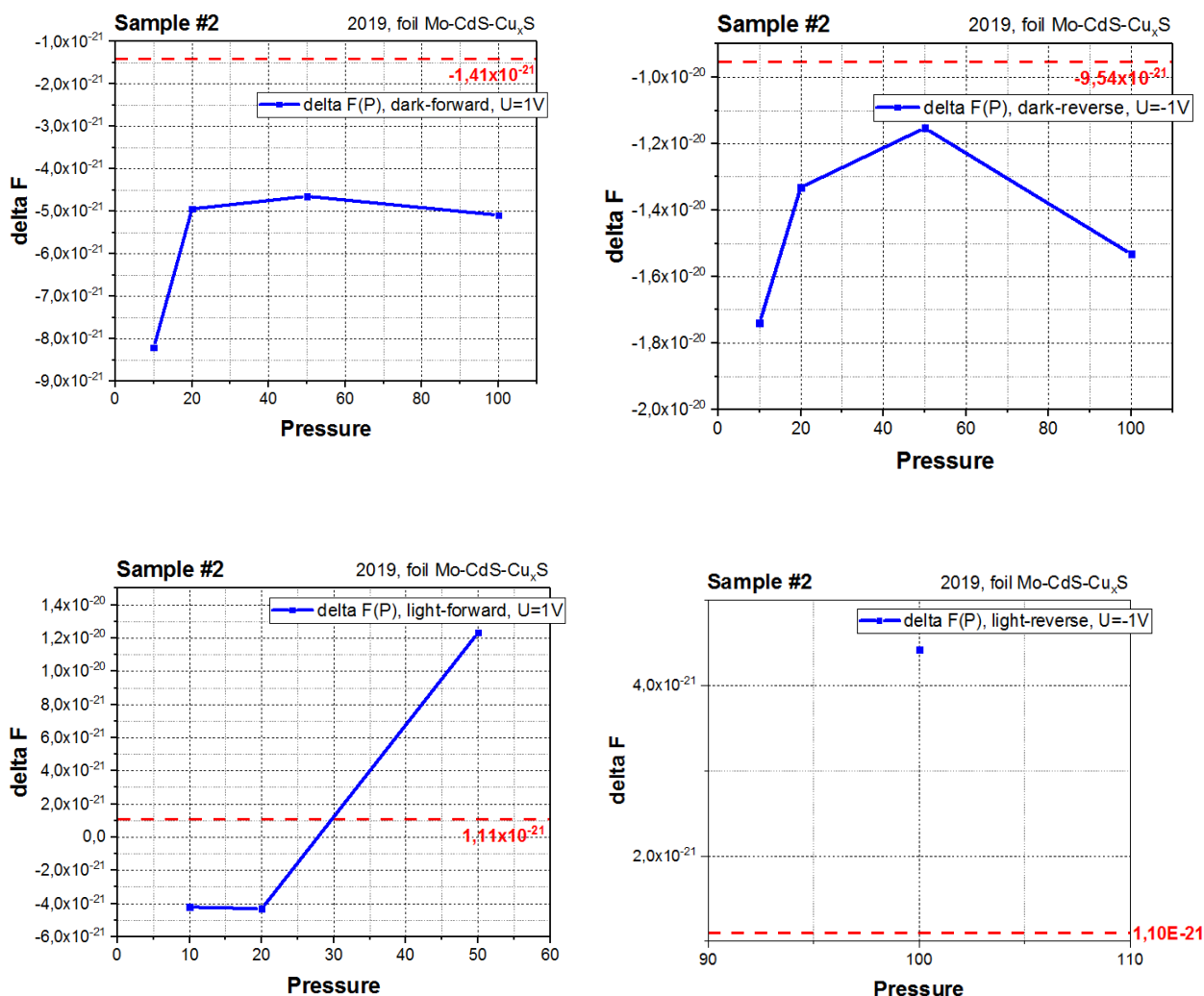
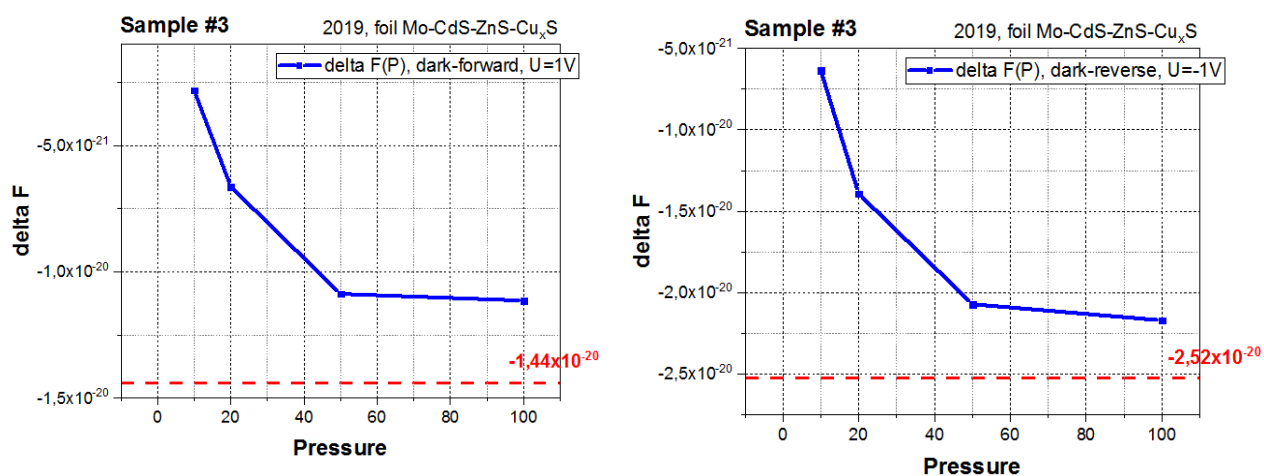


Рис. 3.99-3.102. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №3 в темновому та світловому режимах.



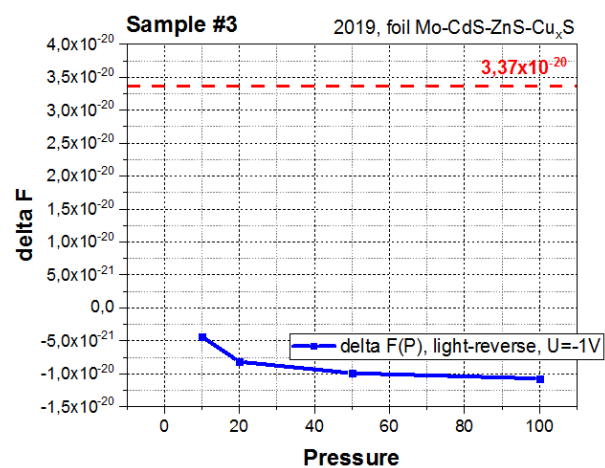
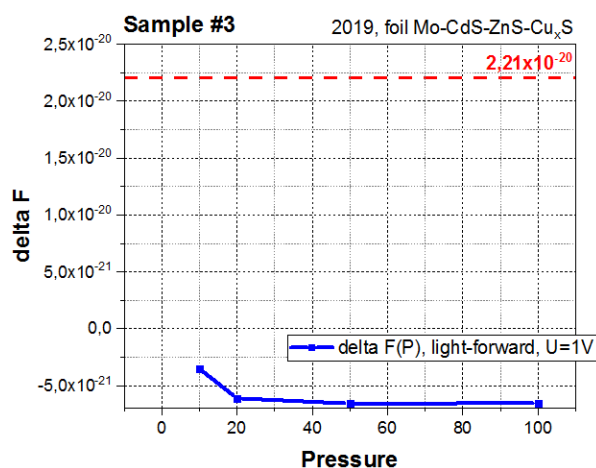


Рис. 3.103-3.106. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №4 в темновому та світловому режимах.

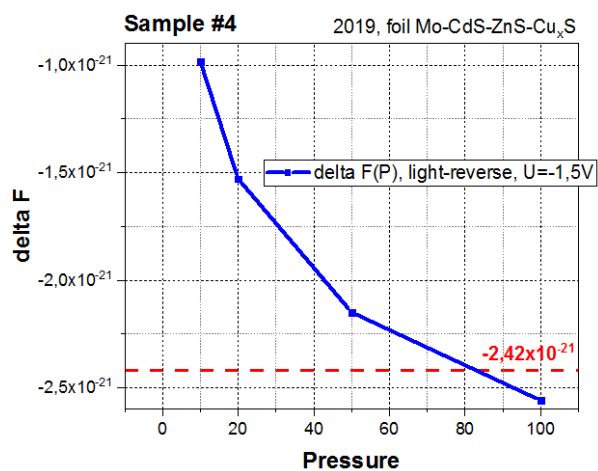
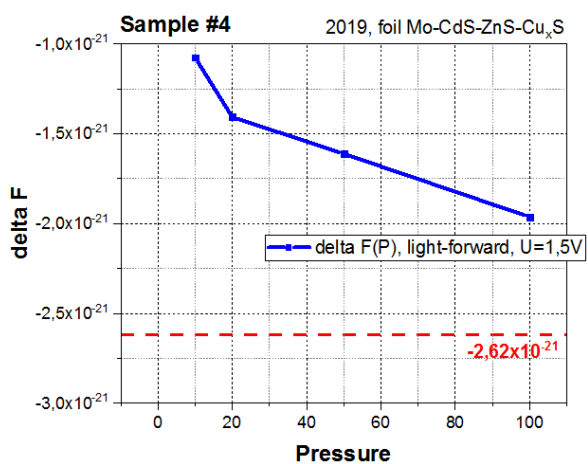
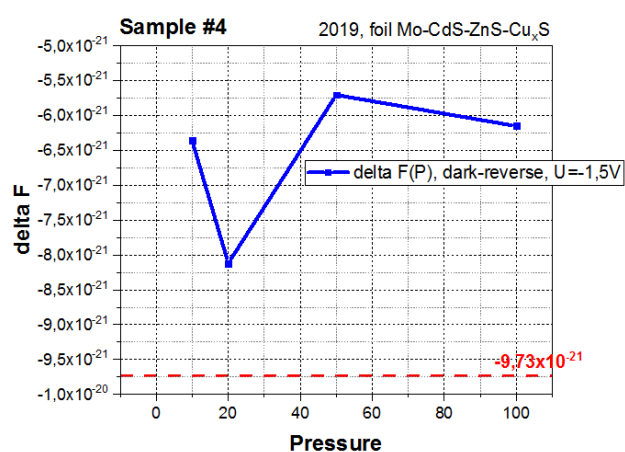
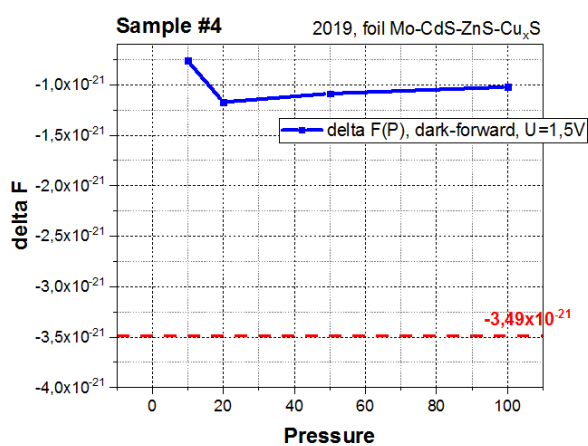


Рис. 3.107-3.110. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №5 в темновому та світловому режимах.

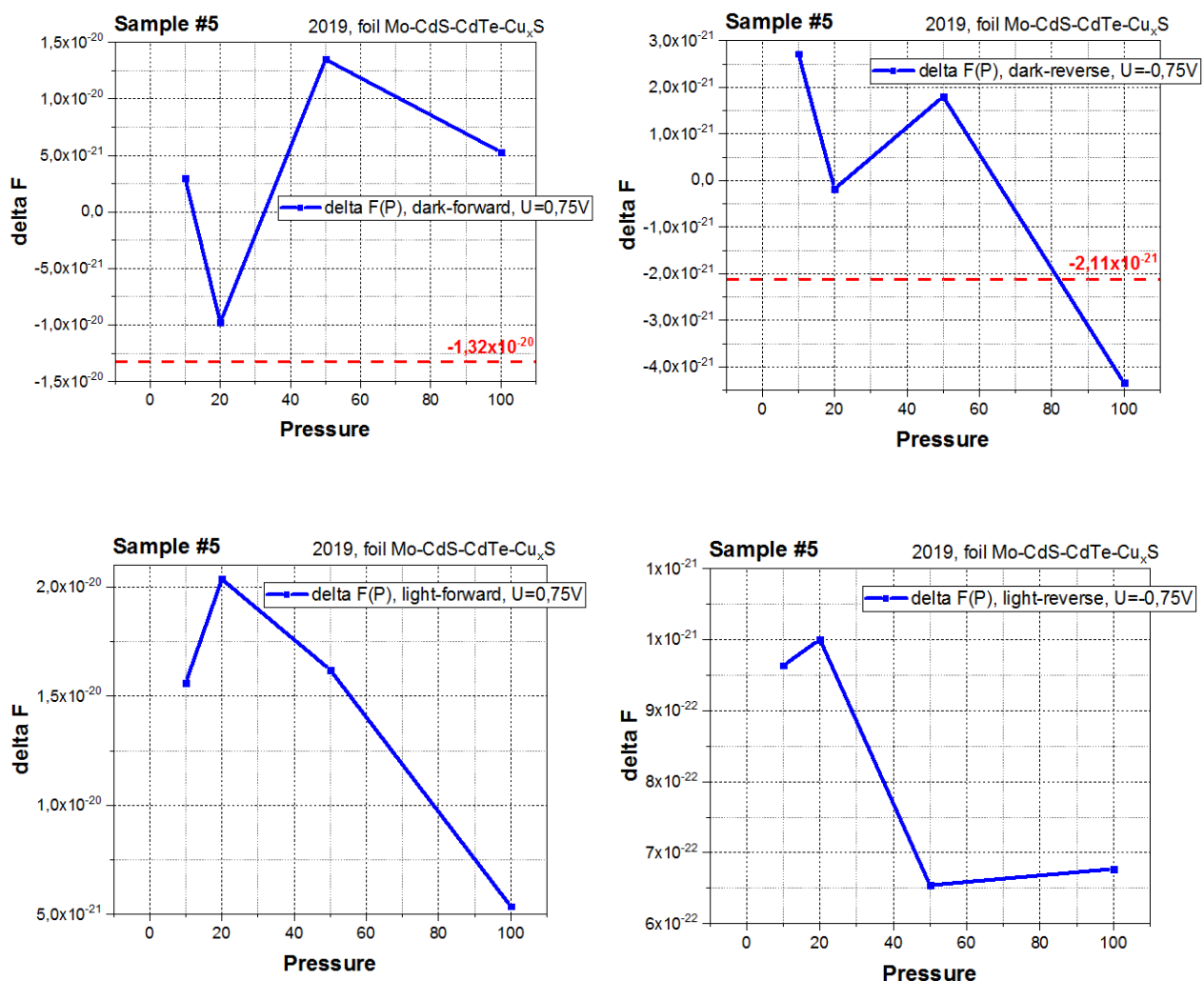
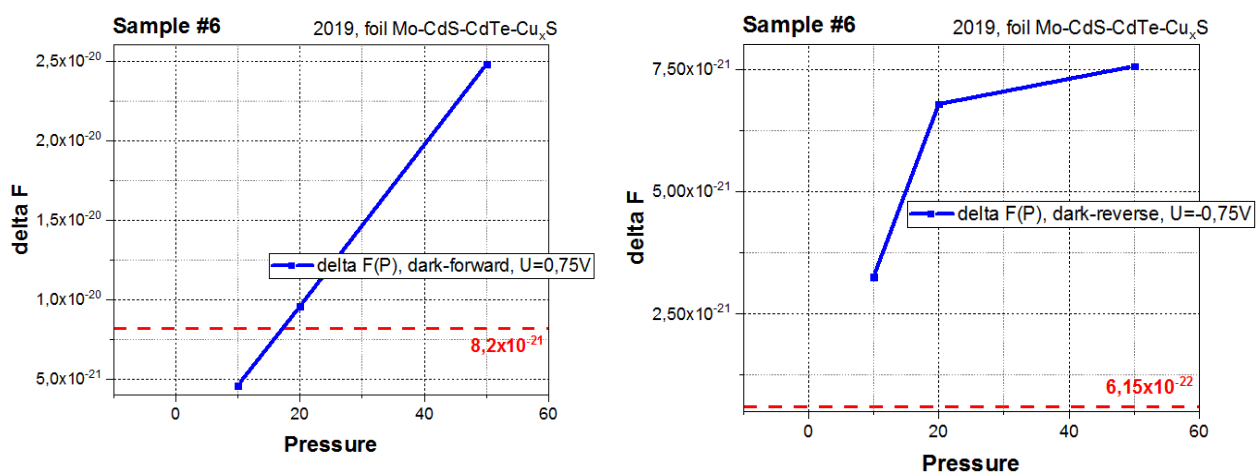


Рис. 3.111-3.114. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №6 в темновому та світловому режимах.



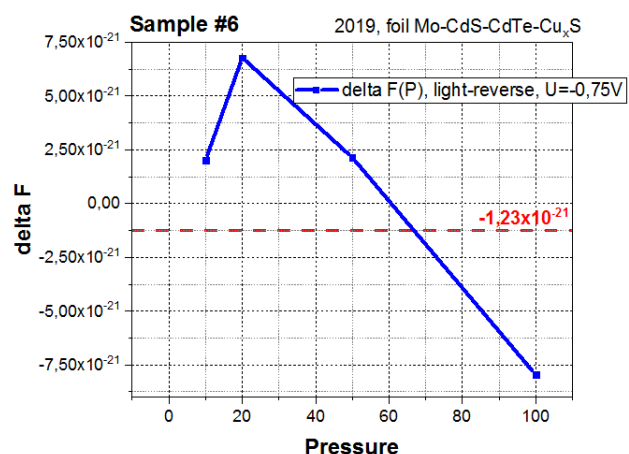
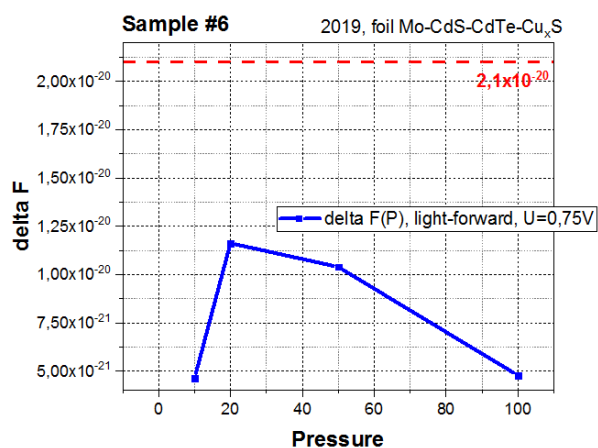


Рис. 3.115-3.118. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №7 в темновому та світловому режимах.

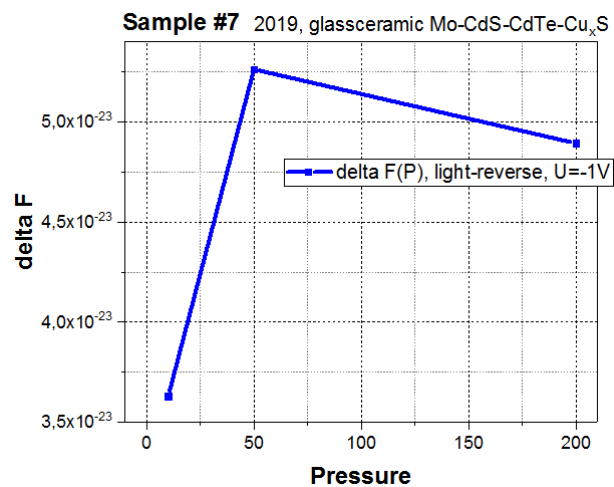
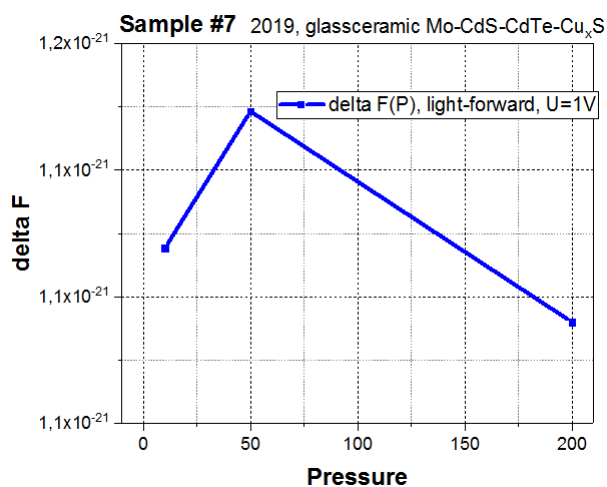
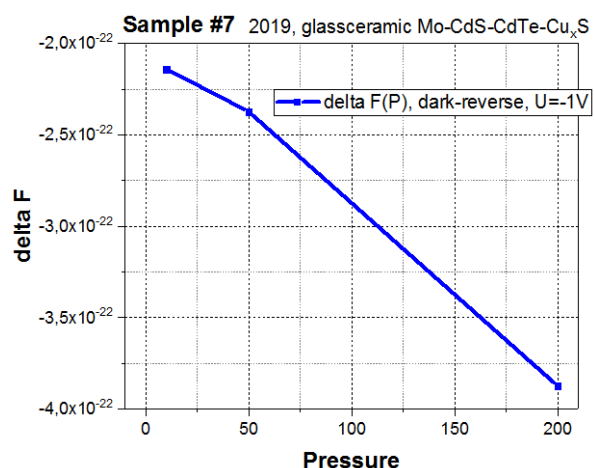
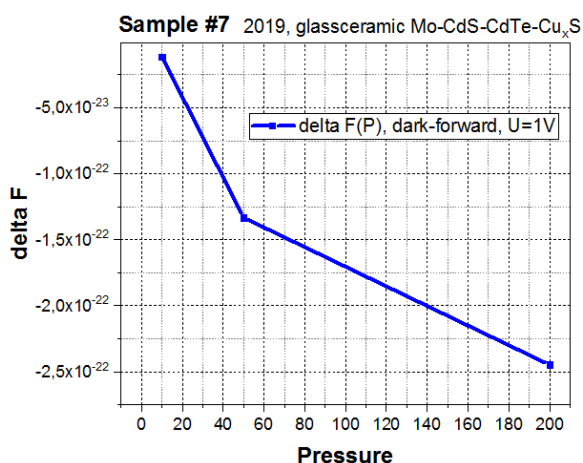


Рис. 3.119-3.122. Залежність зміни висоти бар'єру від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ зразку №8 в темновому та світловому режимах.

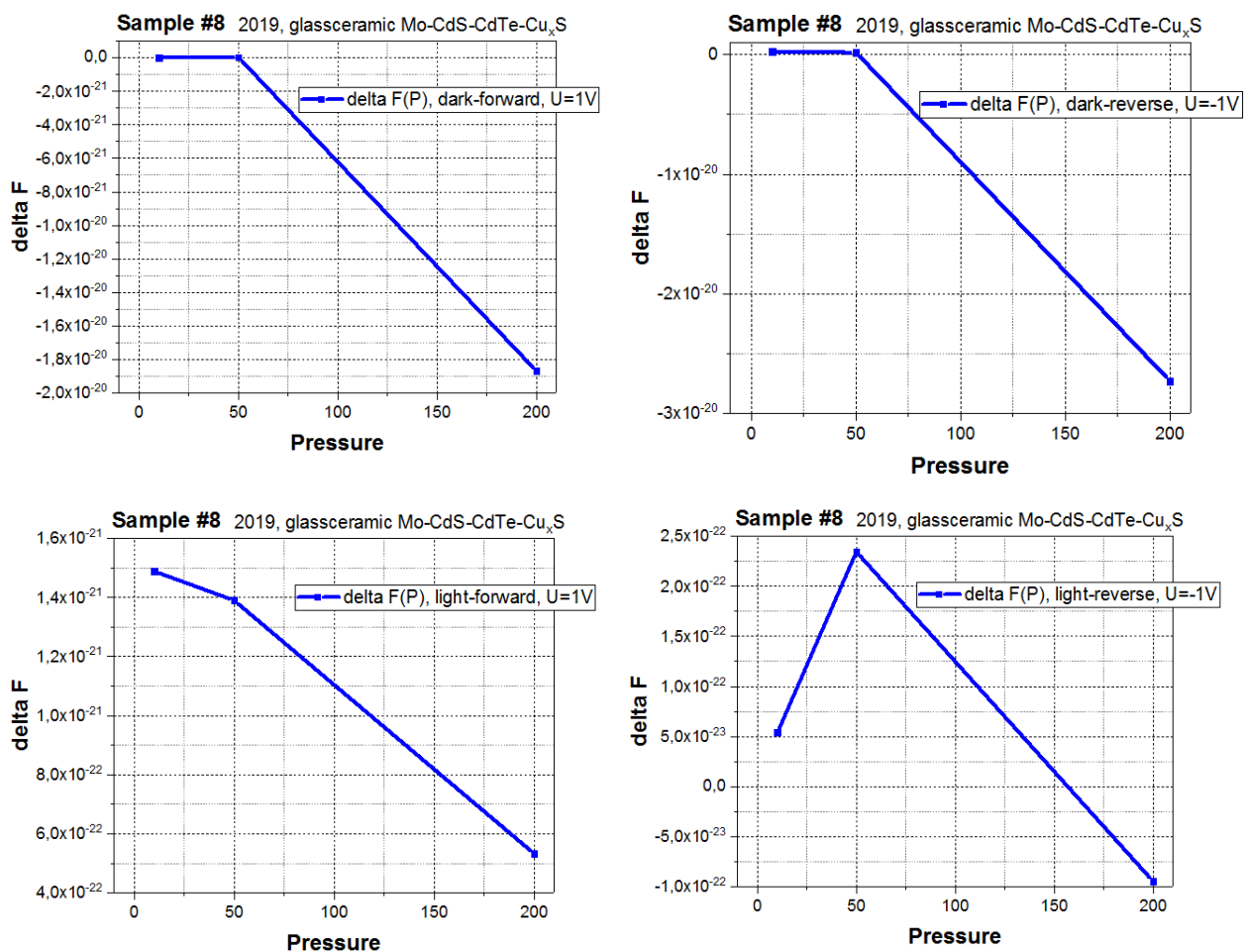
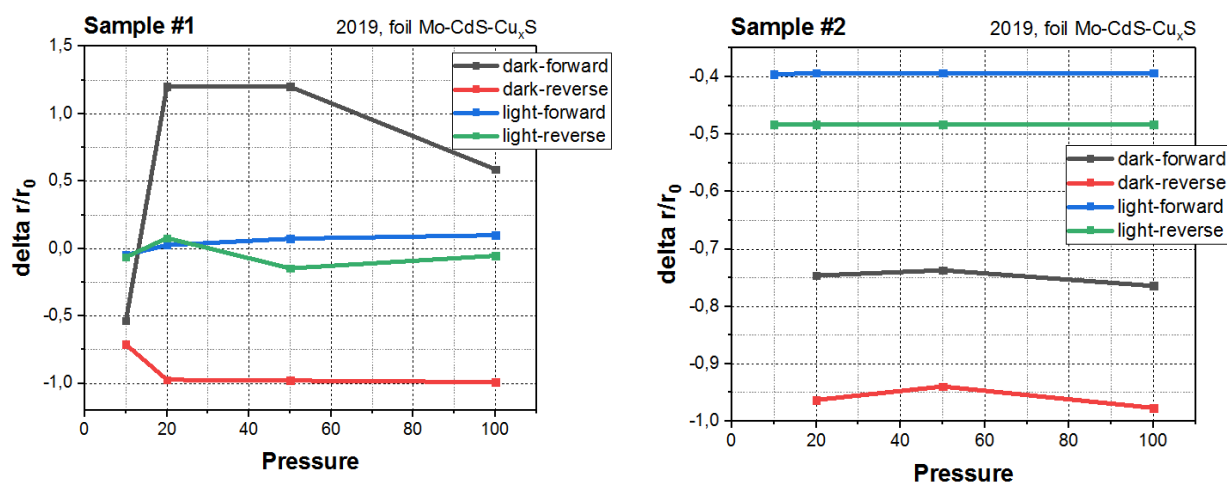


Рис. 3.123-3.130. Залежність параметру “відгук по зміні опору” від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ досліджуваних зразків в темновому та світловому режимах.



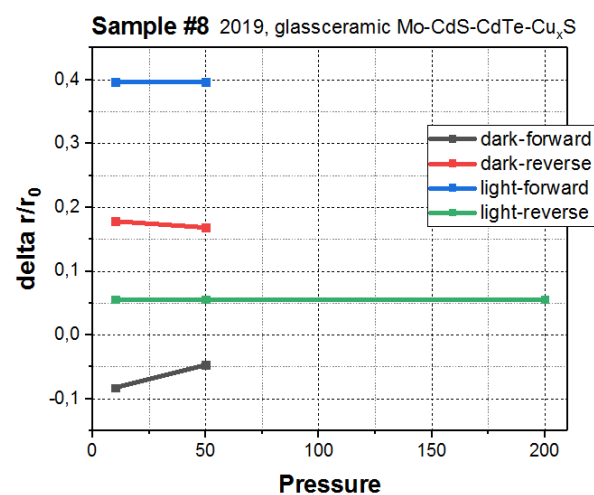
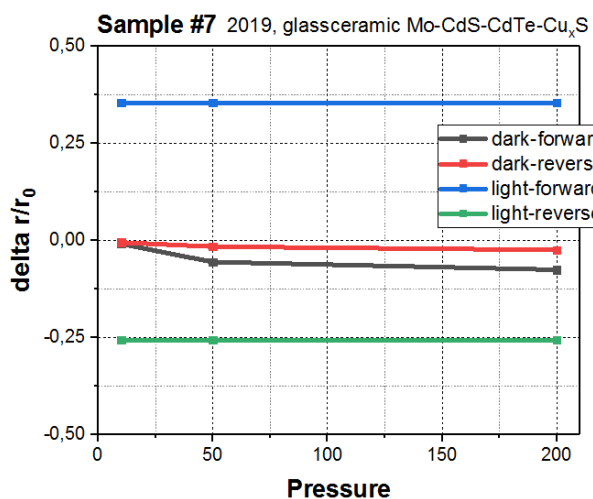
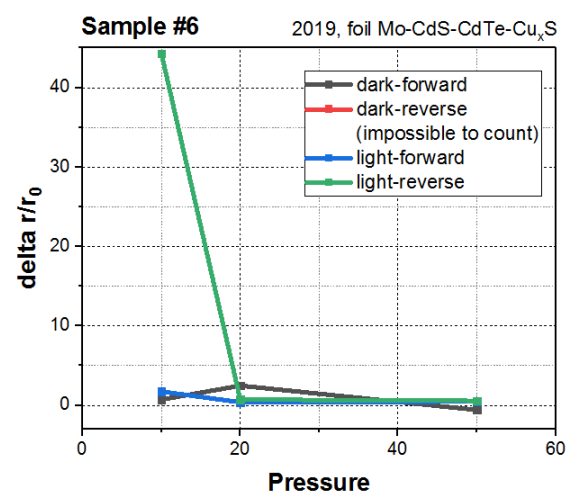
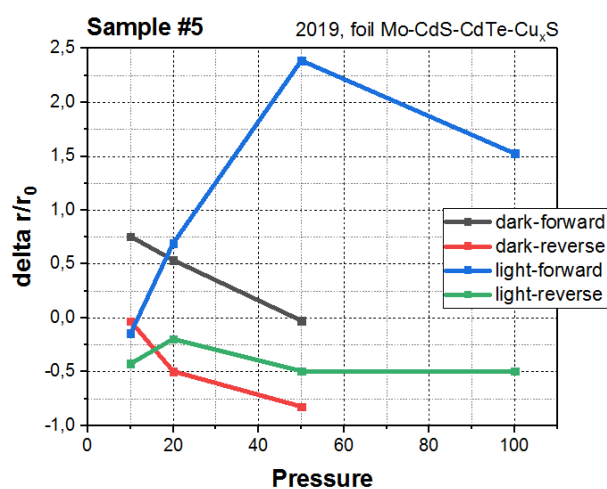
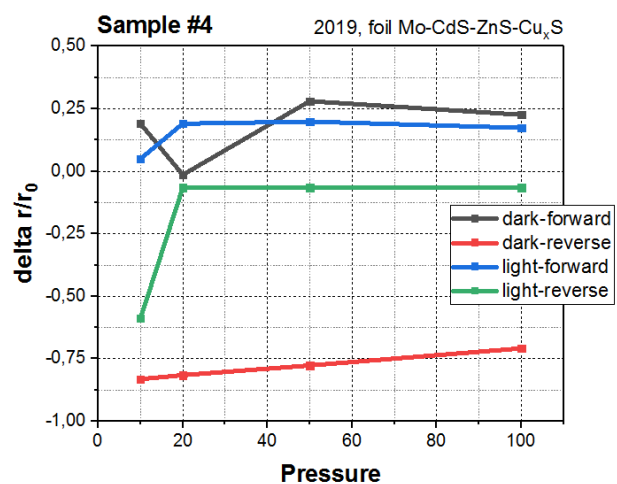
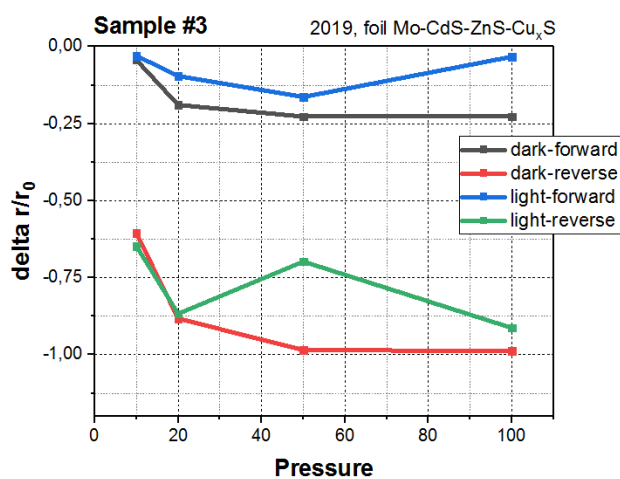
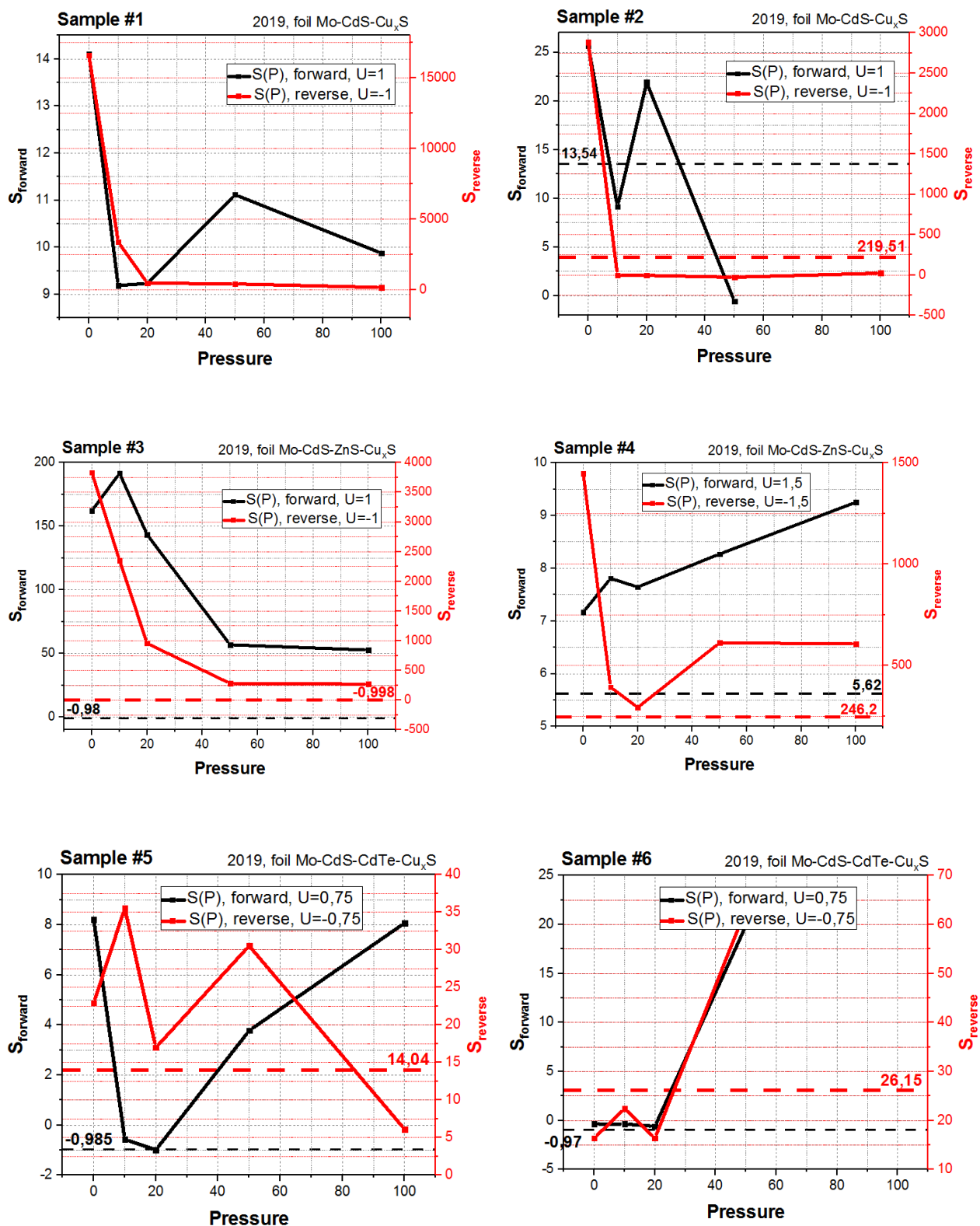
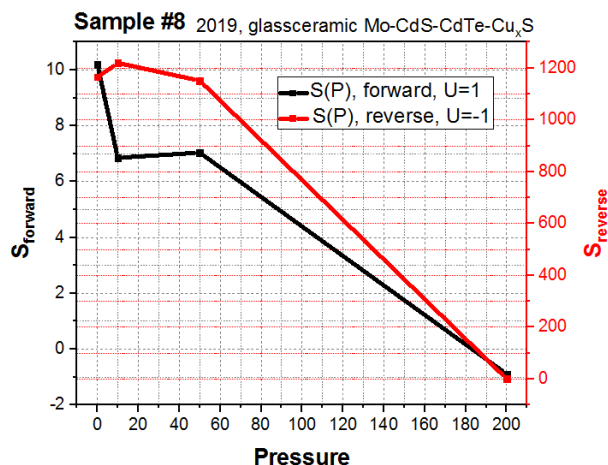
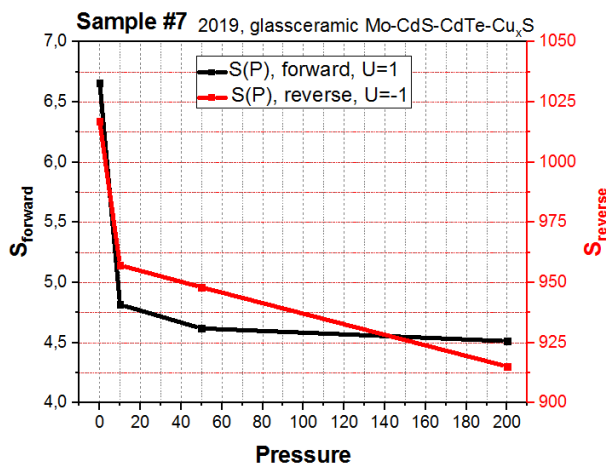


Рис. 3.131-3.138. Залежність коефіцієнту чутливості від тиску для прямої і зворотної гілки ВАХ досліджуваних зразків.





Висновок

Для кількісного порівняння зразків чотирьох груп було розраховано основні параметри діодних структур і сонячних елементів та зроблено такі висновки:

1. Коефіцієнт неідеальності діоду збільшується при збільшенні тиску на зразок, що викликано деформаціями кристалічної ґратки, які ми вносимо при прикладанні тиску (рис. 3.3-3.10).
2. Опір по постійному струму зменшується при прикладанні тиску (рис. 3.11-3.26). То є доказом того, що наша структура має п'єзофототронний ефект і зменшення струму обумовлено появою додаткового заряду за рахунок п'єзоефекту.
3. Диференційний опір при прикладанні тиску зменшується також (рис. 3.27-3.42). Зворотній опір та диференціальний опір по зворотній гілці також зменшується при прикладанні тиску для зразків 1-ї та 2-ї груп (рис. 3.43, 3.44, 3.51, 3.52, 3.59, 3.60, 3.67, 3.68).
4. Коефіцієнт випрямлення при прикладанні тиску (рис. 3.75-3.90) зменшується для зразків 1-ї та 2-ї груп, тому що при прикладанні тиску в нас є збільшення як прямого так і зворотного струму на ВАХ.
5. Зміна висоти бар'єру (рис.3.91-3.122), яка демонструє чутливість до тиску, збільшується при прикладанні тиску. Таким чином найбільшу

чутливість до тиску зразки демонструють при відносних значеннях тиску 50 та 100, що означає збільшення заряду при цих значеннях за рахунок п'єзоефекту.

6. Значення відгуку по зміні опору (рис. 3.123-3.130), що є по суті відносною зміною опору при прикладанні тиску, розрізняється для темнових та світлових характеристик, що говорить про додаткові фізичні явища, котрі стимулюють виникнення додаткового п'єзозаряду при освітленні.
7. Найбільшу чутливість до тиску (рис. 3.131-3.138) показали зразки 3-ї групи - foil Mo-CdS-CdTe-Cu_xS.

Загальні висновки

Розглянуто принцип п'єзотронного та п'єзофототронного ефектів, метод термічного осадження; діодні структури чотирьох різних груп матеріалів А2Б6. В роботі проведено широкий огляд систем матеріалів для п'єзотроніки та п'єзофототроніки, зроблено аналіз властивостей вирощених зразків, наведено таблиці отриманих характеристик та параметрів, наведено формули для цих обчислень. Далі йде стартап розділ та загальні висновки по дисертації. В роботі проаналізовано яким чином тиск та освітлення впливають на вольт-амперні показники досліджуваних плівок та їх такі параметри, як коефіцієнт неідеальності, коефіцієнт випрямлення, відгук по зміні опору, чутливість зразку, висота бар'єру. Значну частину роботи займає огляд п'єзотронних та п'єзофототронних матеріалів. Розробка технології отримання саме полікристалічних плівок з п'єзотронним та п'єзофототронним ефектом є актуальною, тому що застосування плівок замість монокристалів веде до значного здешевлення ПП. Прогнозується перспективність тонко-плівкових пристроїв, що обумовлено їх функціональними можливостями, також економічними факторами.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В роботі досліджується наявність п'єзотронного та п'єзофототронного ефектів в гетероструктурах на основі плівок CdS, CdTe, ZnS. Для цього зроблено серію вимірів вольт-амперних характеристик при увімкненому та вимкненому світлодіоді, без тиску / при прикладанні тиску до структури / при скручуванні. Аналіз діодних папараметрів показав наступне: диференційний опір по прямій гілці змінюється від значення 50 Ом для зразків із CdTe на фользі, до значень 10^6 Ом для зразків CdS-ZnS на фользі. Як відомо для класичних діодів на p-n переході диференційний опір має бути одиниці Ом. Але матеріали із п'єзовластивостями зазвичай є діелектриками і для того щоб напівпровідник мав п'єзовластивості потрібно, щоб його опір був великий, що ми і отримали із наших розрахунків і вимірів, які показали, що саме зразки CdS-ZnS мають найбільший п'єзофототронний ефект.

При порівнянні опору по постійному струму та диференційного опору на прямій гілці ВАХ ми бачимо, що R_F більше ніж r_F (10^7 Ом $>$ 10^6 Ом), що співпадає із відношення R_F до r_F для ідеального діоду.

Таким чином, ми можемо зробити висновок, що найкращий п'єзофототронний ефект мають структури CdS-ZnS, осаджені на молібденову фольгу і створені фотодетектори на основі цієї структури можуть бути використані як сенсори тиску.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

4. Стартап проект

Як відомо, стартап — це недавно створена компанія (можливо ще не зареєстрована офіційно але, планує стати офіційною), що будує свій бізнес на основі інновацій або інноваційних технологій, володіє обмеженою кількістю ресурсів (як людських так і фінансових) і планує виходити на ринок. Також слід зазначити, що інноваційні технології можуть бути глобальними (тобто дана інновація буде інновацією для всього світу) або локальними (тобто дана технологія та ідея будуть запозичені, але будуть інновацією в конкретному регіоні або країні). Також стартап - це підприємницький проект, який завжди оцінюється вище своєї поточної вартості. Оцінка стартапу ґрунтується на фінансових прогнозах майбутніх грошових потоків, яким як правило надзвичайно складно дати об'єктивну оцінку в силу непередбачуваності галузі високих технологій.

Слід зазначити такі фази розвитку стартапу:

1. пасивна стадія (seed stage) – присвячується пошукові та визначенню ідеї стартапу та форм її реалізації. Саме тут здійснюється пошук підприємницької ідеї, збирається початкова інформація про продукт, ринок, галузь, споживачів;
2. стадія запуску (startup stage) – матеріалізація бізнес ідеї, ретельний аналіз процесів виробництва та продажу продукту і швидке виправлення помічених проблем.
3. стадія зростання (growth stage) – ключова стадія, має відбутись лавиноподібне збільшення обсягу реалізації продукції, і викликане ним збільшення фінансового потоку. Темп зростання повинен бути вищим за середній темп зростання економіки; стартап - компанія повинна не пізніше, ніж через п'ять років після запуску отримати можливість

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

перейти до внутрішнього фінансування — тобто жити свій розвиток власним коштом.

4. стадія розширення (expansion stage) – стартап перестає бути стартапом і перетворюється на звичайну компанію, головне завдання якої розширення.
5. стадія «виходу» (exit stage) – означає, що інвестори отримують можливість витягти вкладені колись інвестиції за рахунок збільшення вартості компанії, що є наслідком зростання грошового потоку.

Проблема даної дипломної роботи полягає в тому, що на початковому етапі стартапу ідея доступна тільки її автору, а основним завданням маркетингу є донесення сутності ідеї до якомога більшої кількості людей та формування у них позитивних вражень від ідеї. Вважається що маркетинг стартапу є ключовим моментом, його приблизний внесок в успіх стартапу становить 80-95%. До того ж маркетинг має бути якісним та відрізнятися від маркетингу товарів і послуг. Маркетинг стартапу можна визначити як сукупність інструментів та заходів із ознайомлення цільової аудиторії з ідеєю продукту /послуги, просування ідеї та безпосередньо товару/послуги на ринок з метою підвищення зацікавленості та прихильності потенційних споживачів, залучення споживачів, інвесторів тощо.

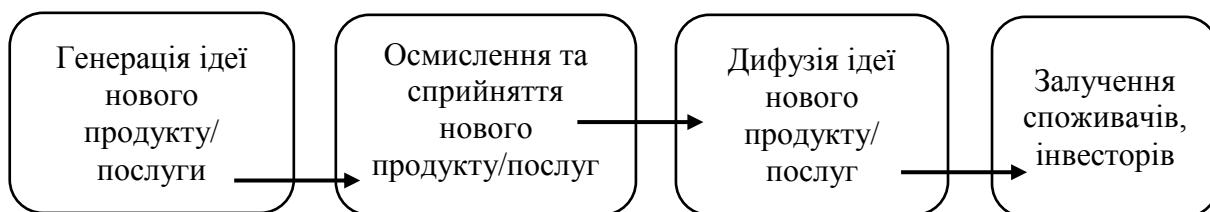


Рис. 4.1. Схема маркетингу стартапу.

Стратегія – це план дій на визначений період часу із зазначенням виконавців та способів реалізації. Відповідно, маркетингова стратегія стартапу стосується плану ознайомлення цільової аудиторії з ідеєю продукту, визначення кола потенційних споживачів, забезпечення їх прихильності до

товару / послуги та залучення інвесторів з метою розширення бізнесу. Маркетингова стратегія має бути чітко прописана у вигляді документа, що можна в майбутньому редагувати. Крім усього іншого, обов'язково повинні бути:

- чітке розуміння, опис, формулювання ідеї, продукту і його унікальні характеристики;
- мета компанії;
- позиціонування;
- аудиторія і її сегменти.

Тільки після опрацювання цих основ, можна обирати, які канали будуть використовуватись, які бюджети знадобляться і т.д.

Існують такі види маркетингових стратегій за М. Портером:

(за М. Портером, існують три базові стратегії розвитку, що відрізняються за ступенем охоплення цільового ринку та типом конкурентної переваги, що має бути реалізована на ринку (за витратами або визначними якостями товару)).

1. Стратегія лідерства по витратах

Передбачає, що компанія за рахунок чинників внутрішнього і/або зовнішнього середовища може забезпечити більшу, ніж у конкурентів маржу між собівартістю товару і середньо-ринковою ціною (або ж ціною головного конкурента). Зокрема, ця стратегія припускає, що за рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів і продуктивності підприємство може добитися менших витрат.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги стратегії за Ж.-Ж. Ламбенем:

- фірма здатна протистояти своїм прямим конкурентам навіть у разі цінової війни і в змозі отримувати прибуток при ціні, мінімально допустимій для конкурентів;
- сильні клієнти не можуть добитися зниження ціни нижче рівня, прийнятного для найбільш сильного конкурента;
- низькі витрати забезпечують захист проти сильних постачальників, оскільки дають фірмі велику гнучкість у разі підвищення вхідних витрат;
- низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарів-замінників.

2. Стратегія диференціації

Передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару (у ширшому розумінні – комплексі маркетингу), бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

Переваги стратегії за Ж.-Ж. Ламбенем:

- по відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність;
- прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів;
- підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника;
- відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

Реалізація цієї стратегії вимагає, як правило, більш високих витрат. Проте успішна диференціація дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду). При веденні конкурентної боротьби з використанням цієї стратегії на ринку в першу чергу терплять фіаско фірми, що не здатні визначати потреби цільових ринків, оперативно реагувати на зміни в ринковому попиті, проводити ефективну політику маркетингових комунікацій, не мають необхідних навичок в області брендингу. Найважливішими здібностями, які повинна мати компанія, що приймає цю стратегію, є з генерування маркетингових ноу-хау, здійснення продуктових новацій.

3. Стратегія спеціалізації

Передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти. Така стратегія може спиратися як на диференціацію, так і на лідерство по витратах, або і на те, і на інше, але тільки у рамках цільового сегменту. Проте низька ринкова доля у разі невдалої реалізації стратегії може істотно підірвати конкурентоспроможність компанії.

В роботі розглянуто структури CdS / CdTe - які є класичними сегнетоелектричними плівковими структурами. Для прикладу візьмемо зразок №6, за яким розраховані всі необхідні параметри та характеристики для подальшого аналізу та оцінки. Оцінимо його ККД за формулою:

$$\eta = \frac{I_{\text{КЗ}} U_{\text{ХХ}}}{P_{\text{изл}}} \cdot 100\%$$

Максимальна величина η для промислового зразку – 10-11%. Вартість 1-го Вт енергії - 75 центів, що робить плівки CdS / CdTe конкурентоспроможними. При прикладанні тиску відбувається збільшення

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму на 10%. З точки зору вартості в промислових масштабах таке зростання призведе до здешевлення 1-го ВТ енергії до рівня 72 центів, що як підсумок спричинить за собою істотну економію.

Висновки:

Так як в роботі не стояла задача із розробки стартап проекту щодо отриманих методом термічного осадження п'єзоелектричних тонких плівок, був зроблений якісний теоретичний огляд про створення та подальшу розробку електричного пристрою, який включатиме в себе досліджені зразки, отримані експериментально їх параметри і характеристики, та описану проблематику даної роботи.

					МРП 171.081.007 ПЗ	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік використаної науково-технічної літератури:

1. Свирская С.Н. Общие сведения о диэлектриках. Сегнето-, пьезо- и пирозлектрики. // Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования — М.: Южный Федеральный Университет — Часть 1. С. 4, 41 — 43, 44 — 49.
2. Пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектрические материалы и их свойства. / Инженерные решения. [Электронный ресурс] // Инженерные решения. — ©2012—2018 — Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/#piezoceramic>.
3. Савельев И. В. Электричество и магнетизм. [Электронный ресурс] : Курс общей физики в 3-х томах. // Библиотека Київського Політехнічного Інституту імені Ігоря Сікорського : Фізико Математичний Факультет, Кафедра Загальної Фізики та Фізики Твердого Тіла. — 14.2 Мб — 2001.
4. Левшина К. С. Электрические измерения физических величин. / И. В. Новицкий. — М.: Энергоатомиздат, 1973. — С. 107 — 130.
5. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. / [Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В.] — М.: Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики. — С. 7 — 9, 17 — 19.
6. Enhancing sensitivity of a single ZnO micro/nanowire photodetector by piezo-phototronic effect. Q. Yang, X. Guo, W. H. Wang, Y. Zhang, S. Xu, D. H. Lien, Z. L. Wang // ACS Nano – 2010, 4, 6285.
7. Piezopotential gated nanowire devices: Piezotronics and piezo-phototronics. Z. L. Wang // Nano Today – 2010, 5, 540.
8. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. Z. L. Wang, J.H. Song // Science – 2006, 312, 242.

9. Towards Self-Powered Nanosystems: From Nanogenerators to Nanopiezotronics. Z. L. Wang // Advanced Functional Materials – 2008, 18, 3553.
10. ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology. Z. L. Wang // Materials Science and Engineering – 2009, R64, 33.
11. Lateral nanowire/nanobelt based nanogenerators, piezotronics and piezophotonics. Z. L. Wang, R. S. Yang, J. Zhou, Y. Qin, C. Xu, Y. F. Hu, S. Xu // Materials Science and Engineering – 2010, R70, 320.
12. Z. L. Wang. Georgia Institute of Technology, SMARTech digital repository [Електронний ресурс] // Nanogenerators for self-powered devices and systems – 2011 – Режим доступу: <http://hdl.handle.net/1853/39262>.
13. Y. F. Gao, Z. L. Wang, Nano Lett. Electrostatic Potential in a Bent Piezoelectric Nanowire // The Fundamental Theory of Nanogenerator and Nanopiezotronics – 2007, 7, 2499.
14. Z. Y. Gao, J. Zhou, Y. D. Gu, P. Fei, Y. Hao, G. Bao, Z. L. Wang, J. Effects of piezoelectric potential on the transport characteristics of metal-ZnO nanowire-metal field effect transistor. // Journal of Applied Physics – 2009, 105, 113707.
15. C. L. Sun, J. A. Shi, X. D. Wang, J. Fundamental study of mechanical energy harvesting using piezoelectric nanostructures // Journal of Applied Physics – 2010, 108, 034309.
16. Z. Y. Gao, J. Zhou, Y.D. Gu, P. Fei, Yue Hao, G. Bao, Z. L. Wang, J. Effects of piezoelectric potential on the transport characteristics of metal-ZnO nanowire-metal field effect transistor // Journal of Applied Physics – 2009, 105, 113707.
17. S. S. Lin, J. I. Hong, J. H. Song, Y. Zhu, H. P. He, Z. Xu, Y. G. Wei, Y. Ding, R. L. Snyder, Z. L. Wang. Phosphorus Doped $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ Nanowire Arrays // Nano Letters – 2009, 9, 3877.

18. L. Vayssieres. Growth of Arrayed Nanorods and Nanowires of ZnO from Aqueous Solutions / L. Vayssieres // Advanced Materials – 2003, 15, 464.
19. S. Xu, Z. L. Wang. One-dimensional ZnO nanostructures: Solution growth and functional properties // Nano Research – 2011, 4, 1013.
20. Y. G. Wei, W. Z. Wu, R. Guo, D. J. Yuan, S. Das, Z.L. Wang. Wafer-Scale High-Throughput Ordered Growth of Vertically Aligned ZnO Nanowire Arrays // Nano Letters – 2010, 10, 3414 .
21. Z. W. Pan, Z. R. Dai, Z. L. Wang. Nanobelts of Semiconducting Oxides // Science – 2001, 291, 1947.
22. X. D. Wang, C. J. Summers, Z. L. Wang. Large-Scale Hexagonal-Patterned Growth of Aligned ZnO Nanorods for Nano-optoelectronics and Nanosensor Arrays // Nano Letters – 2004, 3, 423.
23. J. Zhou, P. Fei, Y. D. Gu, W. J. Mai, Y. F. Gao, R. S. Yang, G. Bao, Z. L. Wang. Piezoelectric-Potential-Controlled Polarity-Reversible Schottky Diodes and Switches of ZnO Wires // Nano Lettery – 2008, 8, 3973.
24. W. Z. Wu, Y. G. Wei, Z. L. Wang. Strain-Gated Piezotronic Logic Nanodevices // Advanced Materials – 2010, 22, 4711.
25. P. Gao, Z. Z. Wang, K. H. Liu, Z. Xu, W. L. Wang, X. D. Bai, E. G. Wang. Photoconducting response on bending of individual ZnO nanowires // Journal of Materials Chemistry. – 2009, 19, 1002.
26. Y. Liu, Q. Yang, Y. Zhang, Z. Y. Yang, Z. L. Wang. Fundamental theories of piezotronics and piezo-phototronics // Nano Energy – 2015, 1016.
27. Y. Zhang, Z. L. Wang. Piezo-phototronic Effect Enhanced Visible and Ultraviolet Photodetection Using a ZnO–CdS Core–Shell Micro/nanowire // ACS Nano – 2012, 10, 1021.
28. Physics of Semiconductor Devices / Second edition / S.M. Sze, Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey // A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York. Chichester. Brisbane. Toronto. Singapore. 1981.